



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

METODA TLAK-ČAS PRO STANOVENÍ PRŮTOKU NA VELKÝCH VODNÍCH DÍLECH

PRESSURE-TIME METHOD FOR DETERMINATION OF THE FLOW RATE IN THE HYDRO POWER
PLANTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Erik Hrubý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Erik Hrubý**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Metoda tlak-čas pro stanovení průtoku na velkých vodních dílech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při měření průtoku na velkých vodních dílech jsou v souladu s IEC 60041, použitelné pouze dvě metody měření průtoku a to pomocí vrtulek a metoda tlak-čas. Podmínkou pro využití této metody je vhodný přístupný přivaděč s možností měření tlaku na stěnách přivaděče.

Cíle diplomové práce:

Provést literární rešerši.

Provést vyhodnocení průtoku na již změřených datech a to pro lokality PVE Dalešice, PVE Dlouhé stráně a elektrárnu Lipno.

Navrhnout a numericky ověřit vliv modelu ztrát a oblouku v přivaděči na hodnotu vypočteného průtoku.

Seznam literatury:

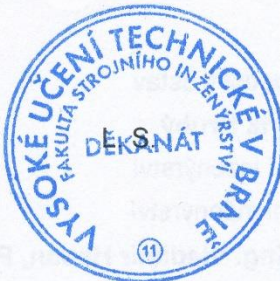
IEC standard 60041: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, third edition, 1991.

Adamkowski, A., Krzemianowski, Z., Janicki, W.: Flow rate measurement using the pressure-time method in a hydropower plant curved penstock, IGHEM 2006, Milano

Ramdal, J.: Efficiency measurements in low head hydro power plants, PhD thesis NTNU, Trondheim 2011

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katoňický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je objasnit použití Gibsonovy metody neboli metody tlak-čas k vyhodnocení nestacionárního průtoku na velkých vodních dílech. Je zde uveden princip této metody, její odvození a problémy, které nastávají při jejím použití. V druhé části je podrobně provedeno vyhodnocení nestacionárního průtoku metodou tlak-čas a výpočet vlivu kinetického členu na výsledný průtok. Další část se zabývá zpřesněním této metody vyhodnocením Penstock faktoru jednotlivých segmentů potrubí (přímé potrubí, kónus a koleno) pomocí MS Excelu a CFD výpočtů. Závěrečná kapitola je věnována vlivu nestacionárních ztrát. Na začátku jsou objasněny základní pojmy a vysvětlen princip těchto ztrát. V další části je pak navržen numerický model ztrát a ověřen jejich vliv na výpočet celkového Penstock faktoru přivaděče.

KLÍČOVÁ SLOVA

Gibsonova metoda, metoda tlak-čas, nestacionární průtok, Penstock faktor, Nestacionární ztráty,

ABSTRACT

The aim of this master thesis is to explain using of the pressure-time method, commonly known as Gibson's method for non-stationary discharge evaluation through water machineries. The thesis included the principle of this method, deriving the method and the problems, which happened in thanks of using this method. In the second part of this thesis are in details shown results of non-stationary discharge by pressure-time method and also there is the computation of the kinetic member on the resulting discharge. Next part is about refinement of this method by evaluation Penstock factor for each segment of feeder (direct pipe, taper and pipe elbow) using MS Excel and CFD calculations. The last capture is about influence of unsteady friction. In the beginning are shown basic terms and explain the principle of this losses. In the next part is proposed numerical model of losses and their influence on calculation of total Penstock factor of feeder.

KEYWORDS

Gibson method, Pressure-Time method, unsteady flow, Penstock factor, Unsteady friction

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRUBÝ, E. Metoda tlak-čas pro stanovení průtoku na velkých vodních dílech. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 72 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Metoda tlak-čas pro stanovení průtoku na velkých vodních dílech* vypracoval samostatně. Vycházel jsem ze zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury a z konzultací s vedoucím diplomové práce doc. Ing. Vladimírem Habánem, Ph.D.

V Brně dne 25. května 2017

.....

Bc. Erik Hrubý

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval především vedoucímu doc. Ing. Vladimíru Habánovi za věcné konzultace, cenné rady a připomínky poskytnuté při řešení této diplomové práce. Taktéž bych rád poděkoval kolektivu doktorandů za užitečné rady týkající se výpočtů v program Fluent. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, která mě během celého dosavadního studia podporovala a vytvářela mi ideální podmínky pro studium.

OBSAH

ÚVOD.....	15
1 METODA TLAK-ČAS	16
1.1 Odvození.....	17
1.2 Výpočet hydraulických ztrát v případě zpětného proudění	19
1.3 Určení horní meze integrace	20
2 MĚŘENÍ TLAKU	23
2.1 Tlakové snímače s elektrickým výstupem	24
2.1.1 Tenzometrické snímače tlaku.....	24
2.1.2 Kapacitní snímače tlaku	25
2.1.3 Piezoelektrické snímače tlaku	25
3 VYHODNOCENÍ PRŮTOKU NA VE LIPNO	26
3.1 VE Lipno.....	26
3.1.1 Lipno I.....	26
3.1.2 Lipno II.....	26
3.2 Měřicí trať	27
3.3 Měření tlaku	28
3.4 Vyhodnocení nestacionárního průtoku v programu MS Excel.....	31
4 VLIV KINETICKÉHO ČLENU PŘI VÝPOČTU PRŮTOKU	33
5 CFD VÝPOČET A VYHODNOCENÍ PENSTOCK FAKTORU	36
5.1 Rozbor úlohy.....	36
5.2 Geometrie a nastavení výpočtu	37
5.2.1 Geometrie jednotlivých výpočtových domén	37
5.2.2 Výpočtové síť.....	39
5.2.3 Nastavení výpočtu	41
5.2.4 Nastavení snímačů	43
5.3 CFD výpočty	45
5.4 Grafické výstupy z CFD výpočtů.....	46
5.5 Vyhodnocení Penstock faktoru	49
5.5.1 Přímé potrubí.....	49
5.5.2 Kónus	50
5.5.3 Koleno.....	57

6 NESTACIONÁRNÍ ZTRÁTY	60
7 ZÁVĚR.....	65
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	68
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	70
SEZNAM GRAFŮ.....	71
SEZNAM TABULEK.....	72

ÚVOD

Hlavním účelem této diplomové práce je objasnit použití Gibsonovy metody k vyhodnocení nestacionárního průtoku na velkých vodních dílech. Průtok se dá vyhodnotit zpravidla dvěma metodami. První metodou je vyhodnocení průtoku přímým měřením pomocí hydrometrických vrtulí, které měří průtok v několika místech průtočného průřezu, z čehož je pak vyhodnocen celkový průtok v závislosti na čase. Druhou již zmíněnou metodou je nepřímá Gibsonova metoda neboli metoda tlak-čas. Vyhodnocení průtoku touto metodou totiž probíhá z naměřených statických tlaků ve dvou místech přivaděče vodní elektrárny před uzavírací armaturou. Tlakové odběry v přivaděči jsou velmi stabilní, odolné a instalují se již při výstavbě. Obrovskou výhodou metody tlak-čas je minimální omezení provozu v důsledku příprav ke zkouškám na vodním díle, čímž nedochází ke ztrátám způsobené odstávkou elektrárny. Dalšími výhodami použití této metody jsou menší náklady jak na přístrojové vybavení, tak na jejich nutnou kalibraci. V dobrých měřicích podmínkách se přesnost vyhodnoceného průtoku metodou tlak-čas oproti hydrometrickým vrtulím pohybuje do 1 %.

První část práce je věnována samotné metodě tlak-čas, jejímu principu, odvození a problémy spojené s jejím použitím při vyhodnocení nestacionárního průtoku. Největším problémem této metody je stanovení horní meze integrace průtoku, čemuž je věnována jedna podkapitola. Část rešerše je zaměřena na problematiku měření tlaku v přivaděči. S tím související je přehled různých typů tlakových snímačů, jejich princip a oblasti použití. Zpravidla nejpoužívanějšími jsou tlakové snímače tenzometrické a kapacitní vzhledem k jejich dlouhodobé stabilitě, malé, avšak velmi odolné konstrukci.

V úvodu experimentální části je uvedena historie VE Lipno I zaměřená na konkrétní rozměry elektrárny, typ použitých strojů a jejich výkony. Následuje zjednodušené schéma reálného měření na VE Lipno I, zobrazení tlakových odběrů v přivaděči apod. V další části se nachází podrobný návod vyhodnocení nestacionárního průtoku metodou tlak-čas ukázaný na jednom z měření VE Lipno I. Vzhledem k diskusím o vlivu kinetického členu na výpočet nestacionárního průtoku metodou tlak-čas byla na konci této kapitoly vyhodnocena chyba výsledného průtoku, pokud bude tento člen zanedbán.

Druhá polovina experimentální části je věnována vyhodnocení Penstock faktoru z hodnot spočítaných Fluentem. Penstock faktor neboli součinitel potrubí, zavádí do výpočtu nestacionárního průtoku metodou tlak-čas chybu. Tento faktor je vždy počítán z naměřených hodnot v přivaděči, které nemohou být změřeny úplně přesně. Chyba se pak promítne nejen do výpočtu celkového Penstock faktoru přivaděče vodní elektrárny, ale také ovlivní vyhodnocený konečný průtok. Úkolem tedy bylo stanovit jednotlivé Penstock faktory přímého potrubí, kónusu a kolena využitím CFD simulace a následného vyhodnocení pomocí programu MS Excel.

Poslední část této diplomové práce pojednává o vlivu nestacionárních ztrát na vyhodnocení celkového Penstock faktoru přivaděče. V úvodu jsou objasněny základní pojmy a vysvětlen princip nestacionárních ztrát. V druhé části je pak navržen numerický model ztrát a ověřen jejich vliv na výpočet Penstock faktoru přivaděče VE Lipno I.

1 METODA TLAK-ČAS [1] [2] [3]

Metoda tlak-čas, obecně známá jako Gibsonova metoda, je jednou ze základních metod, která se používá k měření průtoku na vodních dílech. Tato metoda je založena na vzniku vodního rázu v uzavřeném potrubí vlivem snížení průtoku armaturou. V roce 1923 Gibson Rothwell Normal odvodil vztah pro silově vyvolanou změnu tlaku způsobenou snižováním či zvyšováním průtoku pomocí Newtonova zákona a odvozených zákonů hydromechaniky. Průtok je tedy určen integrací rozdílu statických tlaků mezi dvěma místy v potrubí, který byl vyvolán vodním rázem a průběžně zaznamenáván během zastavování proudění.

Problémem při výpočtu poklesu tlaku Gibsonovou metodou jsou hydraulické ztráty způsobené třením v přivaděči mezi dvěma měřenými průřezy. Za určitých podmínek, zejména při zkouškách čerpací turbíny, dochází k dočasné změně směru proudění. Běžné metody používané k měření průtoku předpokládají, že ztráty, které způsobují pokles tlaku, závisí na druhé mocnině průtoku. Vzhledem k tomu, že je druhá mocnina dané proměnné vždy kladná, tak výpočet poklesu tlaku v závislosti na viskozitě bude mít vždy stejné znaménko bez ohledu na směr proudění. Pro zvýšení přesnosti měření průtoku je třeba spočítat ztráty třením vzhledem k aktuálnímu směru proudění. To je důležité zejména při použití Gibsonovy metody pro čerpadla, kde probíhají velké výkyvy ve směru proudění. Modifikovaný výpočet umožňuje použití metody tlak-čas pro čerpadlový a turbínový provoz hydraulických strojů.

Druhým problémem je definování horní meze integrace z průběhu kolísající tlakové difference zaznamenaného mezi dvěma měřenými průřezy. Přirozené, volné oscilace tlakové difference, které vznikly v důsledku zastavení proudění, se využívají ke stanovení integračních mezí.

Přesnost vypočítaného průtoku závisí na několika faktorech. Chybu ovlivňuje přesnost naměřených tlaků a aspekty výpočtu. Chyba výpočtu průtoku se podle mezinárodní normy většinou pohybuje mezi 1.5-2,3 %. Metoda tlak-čas je doporučována Mezinárodní normou Standard IEC 41:1991, a také Evropským ekvivalentem EN 60041.

Vyhodnocení průtoku Gibsonovou metodou se využívá zejména pro potrubí s konstantním průřezem, ale může se použít také pro přírodní tlakové potrubí se složitější geometrií (zúžení průřezu, koleno atd.). Složitější prvky v potrubí deformují rychlostní pole po průřezu, což pak zhoršuje celkovou přesnost výpočtu.

Tlaky v přivaděči mohou být měřeny speciálními snímači, které se instalují na vnitřní stěny velkých přírodních potrubí při jejich výstavbě. Vzhledem k tomu, že je přírodní potrubí většinou postaveno pod zemským povrchem, není k němu možný přístup z venku.

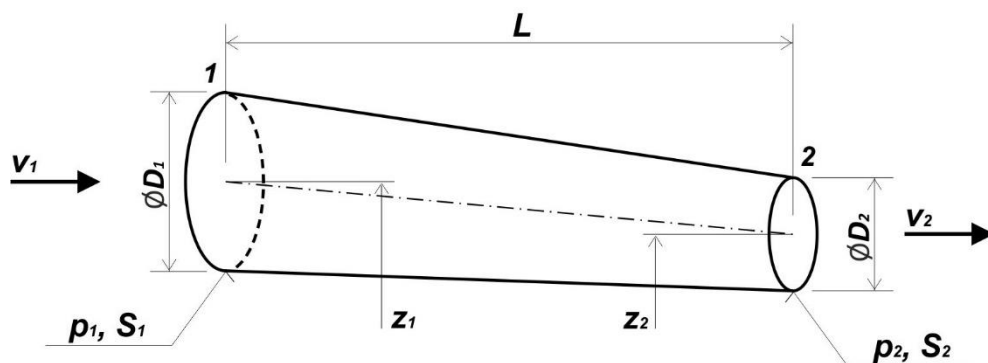
Metodu tlak-čas lze použít za předpokladu, že:

1. Změna hustoty proudícího média bude vlivem tlakového vzrůstu během snižování průtoku téměř nulová.
2. Tlakový nárůst způsobí žádnou nebo téměř nulovou deformaci přírodního potrubí. (přivaděče vodních elektráren jsou většinou vyráběny zejména z nepružných materiálů jako je ocel nebo beton).
3. Proudícím médiem je voda, která se uvažuje jako nestlačitelná kapalina.
4. Tlak způsobený vodním rázem v důsledku pomalého zavírání by měl být relativně malý oproti maximálnímu tlaku při rychlém zavírání.

Vyhodnocení průtoku metodou tlak-čas je výhodné jak z ekonomického hlediska, tak i co se týče přesnosti dosažených výsledků. S postupem času a rozvojem počítačové techniky se proces měření z hlediska získávání a zpracování naměřených dat značně zjednodušil. S dobou se také objevují lepší a přesnější snímače tlaku, což vede k celkovému zpřesnění metody.

1.1 Odvození

Aby bylo možné odvodit vztah pro výpočet průtoku Q , je nutné definovat všechny potřebné veličiny. Bude uvažováno uzavřené potrubí o průřezu S , který se může podél jeho délky měnit, viz obr. 1.1. Proudění bude zastavováno regulačním prvkem např. kulovým uzávěrem. Zkoumaná část potrubí o délce L je omezena plochami 1 a 2. V této oblasti je předpokládáno konstantní rozložení tlaku a rychlosti v průřezu. Průtočný průřez a hustota se vlivem hydraulického rázu nemění.



Obr. 1.1: Schéma potrubí

Za těchto podmínek je jednorozměrné nestacionární proudění mezi plochami S_1 a S_2 potrubí popsáno rovnicí energetické bilance v následujícím tvaru:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + Y_{z12} + \int_1^2 a_t dL \quad (1.1)$$

kde ρ je hustota proudícího média, p_1 a p_2 jsou statické tlaky na krajních plochách S_1 a S_2 (viz obr. 1.1), z_1 a z_2 jsou výšky v těžištích ploch S_1 a S_2 , v_1 a v_2 jsou rychlosti proudění v těžištích ploch S_1 a S_2 , g je gravitační zrychlení a Y_{z12} je pokles tlaku způsobený třecími ztrátami mezi oblastmi 1 a 2, a_t je nestacionární zrychlení, které představuje změnu urychlující měrné energie sloupce kapaliny v potrubí mezi místy 1 a 2.

K určení nestacionárního členu $\int_1^2 a_t dL$ z rovnice (1.1) je vhodné zavést další rovnice:

- Zrychlení sloupce kapaliny a_t :

$$a_t = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.2)$$

- Vyjádření rychlosti z rovnice kontinuity:

$$Q = v \cdot S \Rightarrow v = \frac{Q}{S} \quad (1.3)$$

– Dosazením rovnice (1.3) do vztahu (1.2) lze vyjádřit zrychlení sloupce kapaliny jako:

$$a_t = \frac{\partial \frac{Q}{S}}{\partial t} = \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1.4)$$

Po úpravě rovnice (1.1) vyjde v následujícím tvaru:

$$p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g z_1 = p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g z_2 + \rho Y_{z12} + \rho \int_1^2 \frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} dL \quad (1.5)$$

Statický rozdíl tlaků mezi úseky 1 a 2 je definován jako:

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho g (z_2 - z_1) \quad (1.6)$$

Pokud budou dosazeny do rovnice (1.5) vztahy (1.4) a (1.6) po úpravě vznikne následující tvar:

$$\Delta p = -\Delta p_z - \rho \frac{\partial Q}{\partial t} \int_1^2 \frac{dL}{S} - \rho \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) \quad (1.7)$$

kde $\int_1^2 \frac{dL}{S}$ je Penstock faktor P_f , který vyjadřuje vliv geometrie měřené části potrubí, Δp_z je pokles tlaku způsobený hydraulickými třecími ztrátami.

Pro potrubí s konstantním průřezem lze Penstock faktor vyjádřit ve tvaru:

$$\int_1^2 \frac{dL}{S} = \frac{L}{S} = P_f \quad (1.8)$$

Úpravou rovnice (1.7) vznikne:

$$P_f \rho \frac{\partial Q}{\partial t} = -\Delta p_z - \Delta p - \rho \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) \quad (1.9)$$

Na levé straně rovnice (1.9) se vyskytuje nestacionární člen, který bere v úvahu historii časové změny průtoku $Q = v \cdot S$ zaznamenávanou v průběhu přechodného proudění. Tento člen představuje vliv setrvačnosti kapaliny ve zkoumané části potrubí. Za předpokladu nulové změny velikosti průřezu, lze na pravé straně rovnice (1.9) zanedbat člen vyjadřující vliv kinetické energie $\frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right)$, protože rozdíl průřezů S_1 a S_2 se bude rovnat nule.

1.2 Výpočet hydraulických ztrát v případě zpětného proudění

Jak je uvedeno výše, tak metodu tlak-čas je možné použít pro turbíny i čerpadla. Norma IEC 41 ji ovšem doporučuje aplikovat pouze pro turbínový režim hydraulických strojů. Je možné experimentálně ověřit, že jde použít výpočet Gibsonovou metodou i pro režim čerpání. Musí však být upraveny zavedené výpočetní postupy. Aby bylo možné určit průtok z rovnice (1.9), je třeba odhadnout tlakové ztráty způsobené třením mezi měřenými průřezy potrubí. Typické výpočetní postupy (včetně jednoho, který je uvedený v IEC 41) berou v úvahu hydraulické ztráty, které závisí na druhé mocnině průtoku, ve tvaru:

$$\Delta p_z = R[Q(t)]^2 \quad (1.10)$$

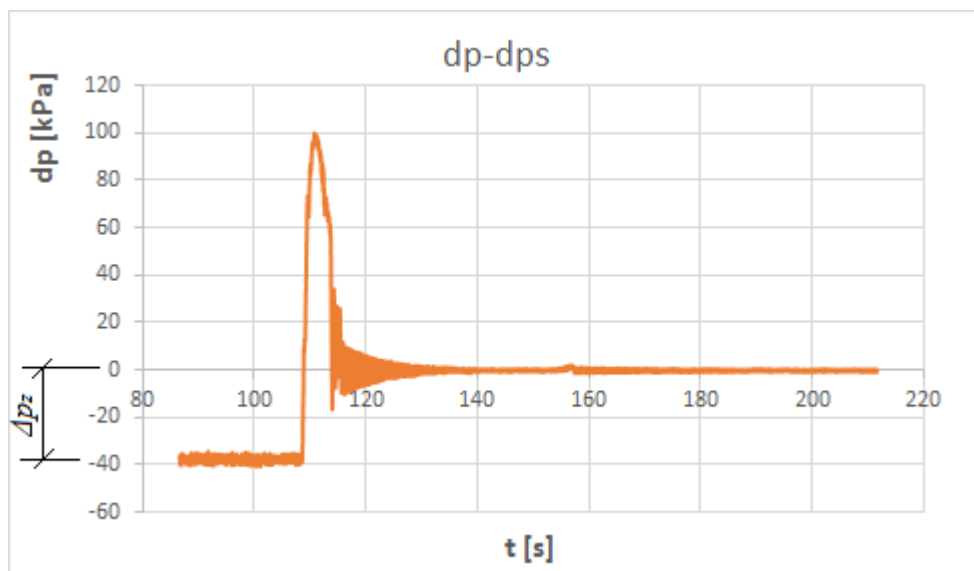
kde R je odporový součinitel.

Hydraulické třecí ztráty vypočítané dle vztahu (1.10) nijak nezávisí na směru proudění (vždy mají stejné znaménko tedy i směr). Takto může vznikat další chyba při určování průtoku. Během zkoušek čerpadel a turbín totiž dochází za určitých podmínek, k významné změně směru proudění kapaliny. Proto je doporučeno upravit rovnici (1.10) následovně:

$$\Delta p_z = R|Q(t)|Q(t) \quad (1.11)$$

kde Δp_z je tlaková ztráta způsobená třením (viz graf 1.1) a Q je průtok před uzavřením klapky (graf 1.1 v intervalu $\langle 0 \div 65 \text{ s} \rangle$).

Tato úprava zvyšuje přesnost měření, zejména v čerpadlovém režimu, protože pracujeme se skutečným směrem proudění v každém časovém okamžiku. V čerpadlovém režimu totiž dochází k dočasnému zpětnému proudění v důsledku zastavení toku.



Graf 1.1: Průběh naměřených tlaků při metodou tlak-čas

Dosažením vztahu pro tlakové třecí ztráty (1.11) do rovnice (1.9) lze upravit rovnici následovně:

$$P_f \rho \frac{\partial Q}{\partial t} = -R|Q(t)|Q(t) - \Delta p \quad (1.12)$$

Úpravou vztahu (1.12) bude vyjádřena rovnice (1.1) v diferenciálním tvaru:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \frac{\Delta p + R|Q(t)|Q(t)}{\rho P_f} \quad (1.13)$$

Z této rovnice lze vyjádřit odporový součinitel R z počátečního průtoku Q_0 , který byl zvolen před zavíráním armatury. Pokud je počáteční průtok považován za ustálený je možné psát:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0 = - \frac{\Delta p + R|Q(t)|Q(t)}{\rho P_f} \quad (1.14)$$

z čehož vyplývá výsledný vztah pro odporový součinitel R :

$$R = - \frac{\Delta p}{Q_0|Q_0|} \quad (1.15)$$

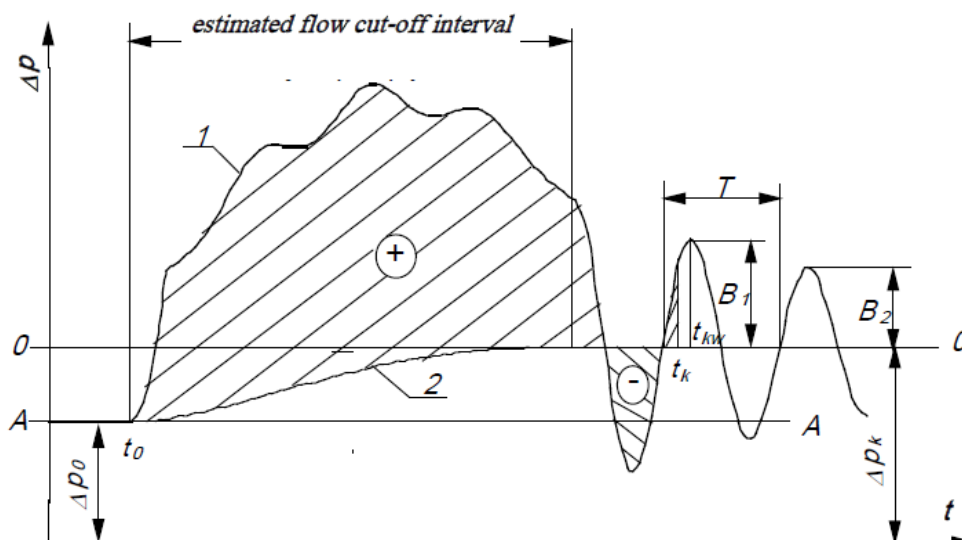
Po integraci rovnice (1.16) v časovém intervalu $\langle t_0 \div t_k \rangle$, ve kterém se mění podmínky proudění z počátečních na koncové, bude vyjádřena změna průtoku mezi těmito podmínkami. Za předpokladu známého průtoku v koncových podmínkách (q_k), tedy po úplném uzavření regulačního prvku, lze vyjádřit vzorec pro výpočet počátečního průtoku (průtok před uzavřením):

$$Q_0 = \frac{1}{P_f \rho} \int_{t_0}^{t_k} [-\Delta p - R|Q(t)|Q(t)] dt + q_k \quad (1.16)$$

Průtok v koncových podmínkách (q_k) není kvůli úniku během zavírání regulačního prvku nulový. Určí se buď přímo z měření nebo výpočtem pomocí samostatné metody.

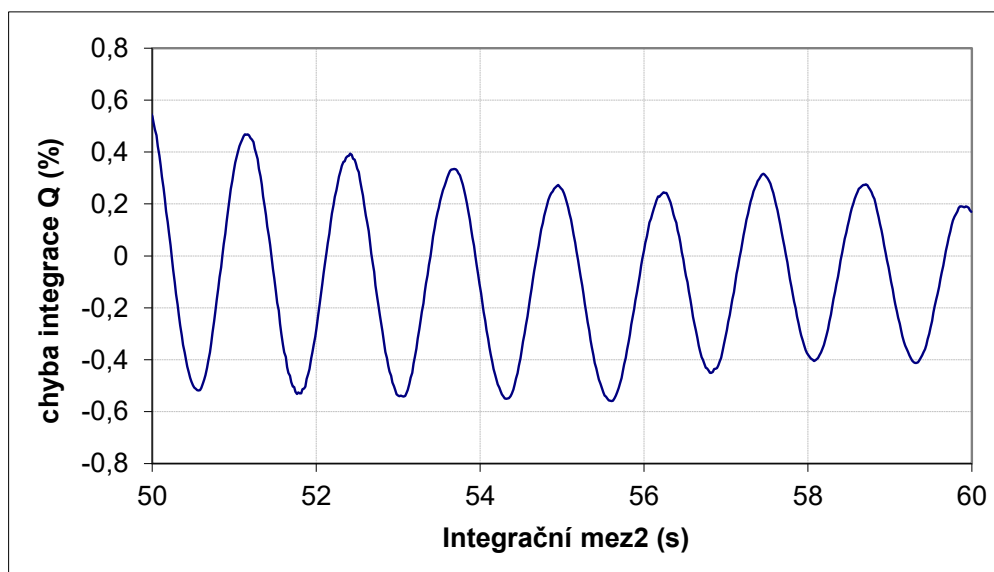
1.3 Určení horní meze integrace

Pro výpočet počátečního průtoku podle rovnice (1.16) musí být specifikovány meze integrace (časový interval), ve kterých byl průtok zastaven. Problém představuje zejména určení horní integrační meze t_k . Dokonce i dobrá synchronizace měření na regulačním zařízení a kolísání tlaku, nezajistí přesné stanovení času. Důvodem je, že neexistuje žádný vztah mezi počáteční dobou zavírání a dobou úplného zastavení proudění (v některých případech je po zastavení průtoku regulační zařízení stále v pohybu, např. v důsledku plastické deformace). Horní integrační mez se pak určí výběrem doby, kde tlak pravidelně kmitá (viz graf 1.2). Tyto výkyvy probíhají v potrubí po zastavení proudu vlivem setrvačných účinků kapaliny spolu s účinky spojenými se stlačitelností kapaliny a deformacemi potrubní stěny. Jeden z výpočtů horní meze integrace je uveden v normě IEC 41, ale obsahuje matematickou nepřesnost (není možné nastavit nulovou hodnotu integrálu tlakových oscilací s úmyslem eliminovat jejich vliv na měření průtoku).



Graf 1.2: Průběh tlakové difference mezi měřenými průřezy během zastavení průtoku [3]

V grafu 1.3 je zobrazen průběh chyby integrace vyhodnoceného průtoku v závislosti na zvolené mezi integrace. Z grafu je patrné, že při špatném zvolení integrační meze se může chyba integrace průtoku vyšplhat až na hodnotu 0,5 %.



Graf 1.3: Závislost chyby integrace průtoku na zvolené horní integrační mezi [18]

Jestliže zvolená doba integrace bude příliš dlouhá, dojde k samovolnému utlumení kmitání tlaku a průtoku, což zavede do výpočtu velkou numerickou chybu. Proto je nutné volit mez integrace v čase, kde ještě dochází k poměrně velkým oscilacím tlaku a průtoku.

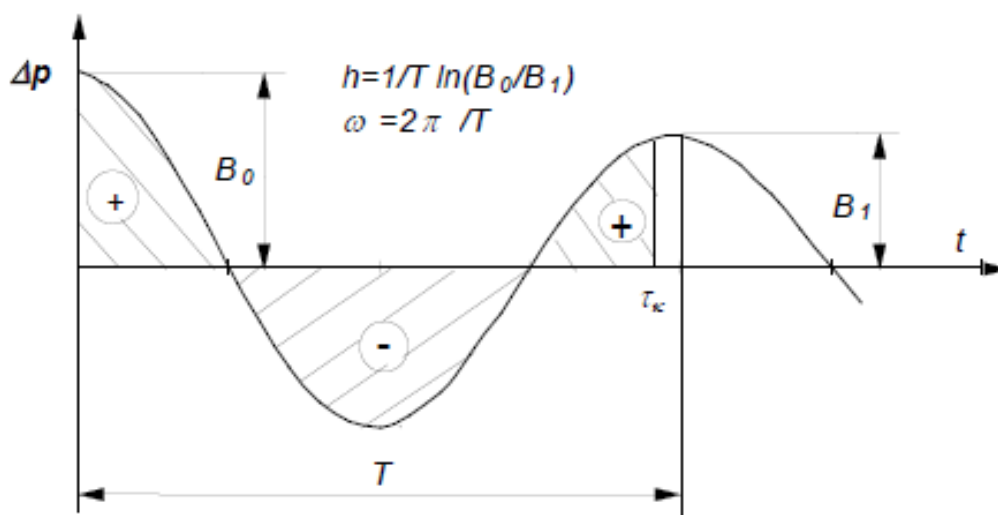
Jak lze určit dobu integrace:

- Zvolit dobu integrace z grafu při nejvyšší měřené amplitudě tlaku. Hodnota průtoku je v tomto místě nulová z důvodu fázového posuvu průtoku vůči tlaku. Poté vizuálně zkontrolovat dokmitávání průtoku na nulovou střední hodnotu.
- Počítat průtok ve vhodně zvoleném časovém intervalu tak, aby byl závislý na mezi integrace. Poté jednotlivé průtoky zprůměrovat a vypočítat celkový průtok.
- Spočítat horní integrační mez pomocí nějaké statistické metody, kterou však neznáme.
- Proložit měřenou tlakovou diferencí po uzavření rozvaděče (viz obr. 1.4) analytickou funkcí ve tvaru:

$$\Delta p = B_0 e^{-ht} \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (1.17)$$

kde $\omega = \frac{2\pi}{T}$ je úhlová frekvence, $h = \left(\frac{1}{T}\right) \ln\left(\frac{B_t}{B_{t+1}}\right)$ je součinitel útlumu, $\ln\left(\frac{B_t}{B_{t+1}}\right) = \delta$ je logaritmický dekrement útlumu a T je perioda tlakové vlny.

Provést numerickou integraci měřené tlakové difference v počátku proložení (uzavření rozvaděče) a pak počítat analyticky z vykreslené funkce.



Graf 1.4: Detail útlumu tlakových oscilací [3]

Aby bylo zabráněno vlivu volných oscilací tlaku při určování průtoku, musí být stanoven konečný čas t_k tak, že bude platit následující podmínka:

$$\int_0^{t_k} B_0 e^{-ht} \cos(\omega_0 t + \varphi) dt = 0 \quad (1.18)$$

Výše uvedená rovnice platí pro stejné celkové oblasti, kde definuje křivku tlumení tlakové vlny nad a pod časovou osou (viz graf 1.4).

2 MĚŘENÍ TLAKU [4] [5] [6] [7]

Pro měření tlaku se využívají tlakoměry. Existují dva způsoby, jakými tlakoměry vyhodnocují neznámý tlak. Buď využívají základní vzorce pro výpočet tlaku $p = \frac{dF}{dS}$; $p = \rho gh$ nebo určují tlak z deformace citlivého prvku, který na tento prvek působí.

Tlakoměry lze rozdělit podle několika hledisek. První dělení je podle velikosti měřeného tlaku:

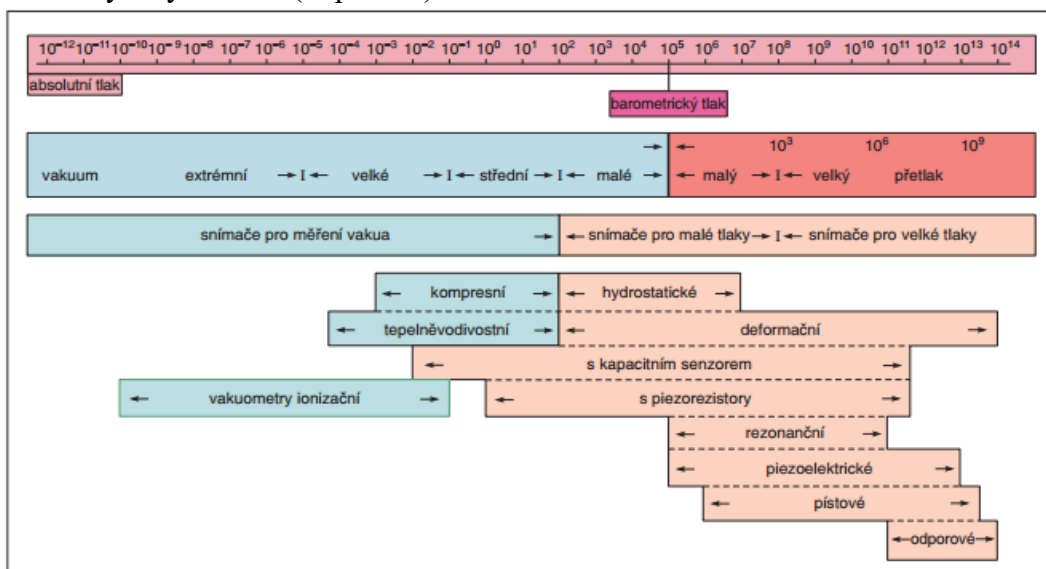
- Manometry – měření přetlaků
- Vakuometry – měření velkých podtlaků
- Manovakuometry – měření přetlaků a podtlaků
- Tahoměry – měření malých podtlaků
- Diferenční tlakoměry – měření tlakových rozdílů
- Barometry – měření tlaku ovzduší

Dalším způsobem dělení je podle typu výstupu z tlakoměru:

- Tlakoměry s mechanickým výstupem
- Tlakoměry s digitálním výstupem
- Tlakoměry s elektrickým výstupem

Posledním způsobem rozdělení je podle principu funkce:

- Kapalinové tlakoměry – hlavně etalonové a laboratorní přístroje. Princip vychází ze vztahu $p = \rho gh$. Měřený tlak je vyrovnáván hydrostatickým tlakem sloupce kapaliny.
- Pístové a zvonové tlakoměry – etalonové přístroje u nichž je měřítkem tlaku zdvih zvonu (zvonové) nebo hmotnost závaží, které je umístěno na pístu (pístové). Princip pístového tlakoměru vychází ze vztahu $p = \frac{dF}{dS}$.
- Deformační tlakoměry – ukazatelem tlaku je velikost deformace pružného prvku. Dělí se na membránové, trubicové a vlnovcové.
- Elektrické tlakoměry – fungují na principu tlakové závislosti některých elektrických veličin. Buď slouží k měření velmi malých absolutních tlaků (ionizační) nebo naopak velmi vysokých tlaků (odporové).



Obr. 2.1: Schéma uspořádání tlakoměrů podle jejich měřicího rozsahu [5]

Při měření na vodních dílech nebo řízení automatizovaných procesů se nejčastěji používají tlakoměry s elektrickým výstupem. Jejich výhodou je možnost zpracování výsledků měření pomocí výpočetní techniky, což je v dnešní době zcela nezbytné. Tlakoměry s elektrickým výstupem jsou jinak nazývány jako tlakové senzory, tlakové snímače, elektrické převodníky nebo tlakové snímače s elektrickým výstupem.

V diplomové práci budou zpracována naměřená data tlaku na velkých vodních dílech v České republice, z nichž je pak vyhodnocen průtok metodou tlak-čas. Data jsou nejčastěji měřena tlakoměry s elektrickým výstupem. Je nutné si tedy objasnit, na jakém principu tyto tlakoměry fungují.

2.1 Tlakové snímače s elektrickým výstupem

Elektrické převodníky tlaku převádí deformaci tlakoměrného prvku na změnu elektrické veličiny jako je kapacita, náboj, odpor atd. Tlak buď působí přímo na citlivý prvek snímače, nebo na deformační člen. Podle toho se snímače tlaku s elektrickým výstupem dělí na:

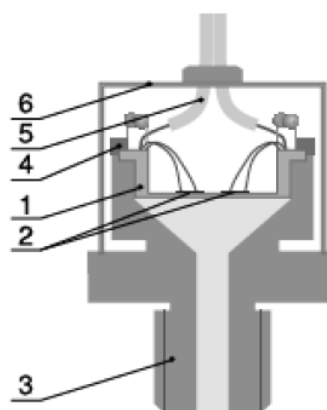
- Snímače s deformačním členem – fungují na podobném principu jako deformační tlakoměry. Tlak je měřen nepřímo přes deformaci použitého deformačního prvku (většinou membrány), který je snímán elektrickým senzorem. Elektrický výstup je dále transformován na výstupní napěťový nebo proudový signál. Patří sem senzory tenzometrické, kapacitní, indukční a piezoelektrické.
- Snímače s elektricky aktivním tělesem – fungují jako elektrické tlakoměry (viz výše). Citlivý prvek přímo měří tlak tak, že mění svoje elektrické vlastnosti. Jelikož tlak působí na citlivý prvek, postrádají tyto snímače deformační mezičlen. Jedná se zejména o senzory piezoelektrické, odporové a některé kapacitní.

2.1.1 Tenzometrické snímače tlaku

Patří mezi nejpoužívanější snímače tlaku. Měří relativní deformaci deformačního prvku a tu pak převádí na výstupní signál, který bývá nejčastěji napěťový. Princip tenzometrických snímačů vychází z piezorezistivního jevu. Fungují tak, že vlivem mechanického namáhání, pohybující se pouze v oblasti pružných deformací, dochází ke změně geometrických rozměrů a krystalografické orientace kovových vodičů a polovodičů. V důsledku těchto změn se následně mění odpor. Tento princip je známý jako piezorezistivní jev. Tenzometrické snímače bývají nejčastěji umístěny buď přímo na deformačním členu nebo v místech největší relativní deformace.

Na obr. 2.2 je zobrazené zjednodušené schéma tenzometrického tlakoměru s membránou. Pozice (1) znázorňuje kovovou membránu z nerezové oceli. Na ní jsou připevněny kovové nebo polovodičové tenzometry (2) v určitém uspořádání. Membrána je ukotvena v tělese (3) kroužkem (4). Připojovací místa pro vodiče (5) se nacházejí na obrubě membrány. Celý tenzometr je před poškozením chráněn krytem (6).

Výhodou tlakoměrů tohoto typu je velký rozptyl měřených tlaků a použití pro různá pracovní média. Toho je docíleno volbou vhodného typu tenzometru s variabilními rozměry deformačního členu.



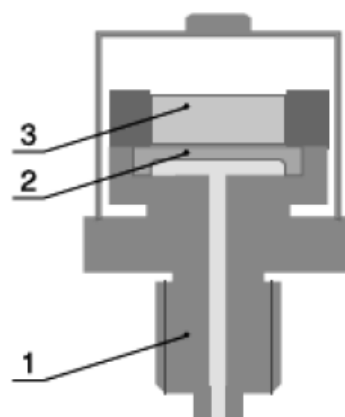
Obr. 2.2: Tenzometrický tlakoměr [4]

2.1.2 Kapacitní snímače tlaku

Rovněž se jedná o snímače s deformačním členem, kterou je nejčastěji membrána. Mají poměrně jednoduchou konstrukci. Principem kapacitních snímačů tlaku je transformace naměřeného tlaku na kapacitu měřicího kondenzátoru. Vzhledem k jejich jednoduchému principu a konstrukci jsou nejpoužívanějšími tlakovými senzory.

Hlavním prvkem senzoru je kondenzátor se dvěma elektrodami. Jednu elektrodu (desku) měřicího kondenzátoru tvoří deformační člen, který vlivem působení měřeného tlaku mění svoji polohu. Druhá elektroda (deska) je upevněna v senzoru. Naměřená kapacita se mění v závislosti na vzájemné poloze obou elektrod a pomocí zabudované elektroniky je vyvedena na výstupní signál.

Vpravo na obr. 2.3 je zobrazeno zjednodušené schéma kapacitního snímače tlaku. Měřicí prvek kondenzátoru tvoří membrána (2), který je pevně uložena v základním tělese senzoru (1). Pozice (3) označuje pevnou desku kondenzátoru vyrobenou ze skla.



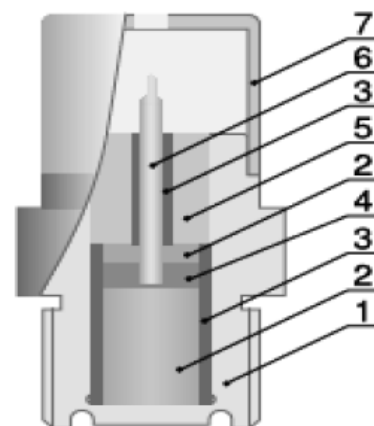
Obr. 2.3: Kapacitní tlakoměr [4]

2.1.3 Piezoelektrické snímače tlaku

Jsou snímače tlaku s elektricky aktivním tělesem. Piezoelektrické tlakoměry fungují na principu přímého piezoelektrického jevu. To znamená, že některé krystaly jsou při jejich deformaci schopny generovat elektrické napětí. Na piezoelektrický krystal, nejčastěji vyrobený z křemíku či turmalínu, se přes oddělovací membránu přivádí měřený tlak. Buď membrána působí přímo na krystal, nebo je od něj oddělena a přenos zajišťuje médium, které je schopné přenášet tlak. Výhodou této konfigurace je, že se piezoelektrický krystal nepoškodí vlivem působení vnějšího prostředí.

Vzhledem k jejich vysoké vlastní frekvenci své použití nacházejí zejména při měření časově závislých průběhů tlaků a rychlých dějů. Obecně je vyloučeno s piezoelektrickými snímači měřit statický tlak. Vzniklý náboj po přiložení tlaku se kvůli špatné izolaci vybíjí, čímž klesá napětí na elektrodách.

Na obr. 2.4 je zobrazeno zjednodušené schéma piezoelektrického tlakoměru. Základní těleso (1) vytváří ve spodní části membránu, kterou odděluje měřené prostředí od citlivého prvku (2). Citlivý prvek (piezoelektrický blok) je separován od tělesa (1) izolací (3). V horní části piezoelektrického bloku je z kovové elektrody (4) odváděn náboj kovovou tyčí (6). Tyč odděluje od mezikusu (5) izolace (3). V horní části je umístěn kryt tlakoměru (7). Vytvořený náboj je pak vodiči odváděn od tyče (6).



Obr. 2.4: Piezoelektrický tlakoměr [4]

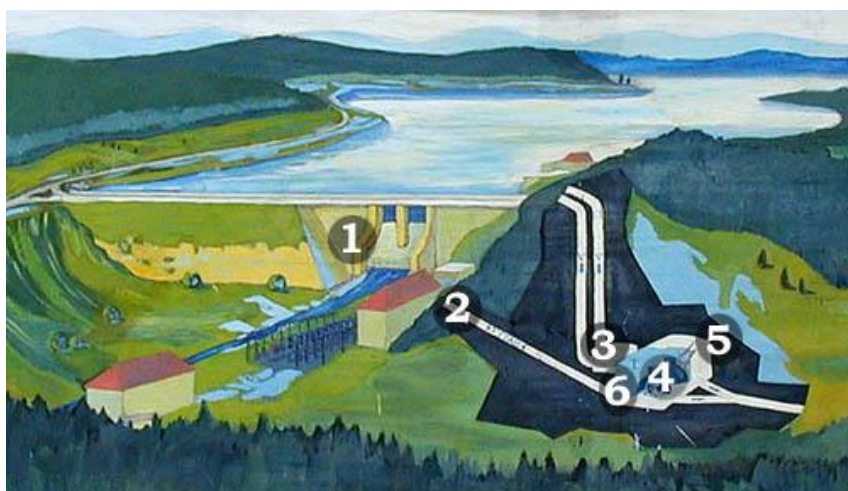
3 VYHODNOCENÍ PRŮTOKU NA VE LIPNO

Vyhodnocení průtoku na velkých vodních dílech probíhá buď pomocí hydrometrických vrtulí nebo metodou tlak-čas. Gibsonova metoda neboli metoda tlak-čas spočívá ve vyhodnocení průtoku z tlakového záznamu získaného z reálného měření na vodní elektrárně Lipno. Tlaky jsou měřeny ve dvou průřezech přivaděče, kde v každém z nich jsou umístěny čtyři tlakové snímače.

3.1 VE Lipno [8] [9] [10]

3.1.1 Lipno I

Vodní elektrárna Lipno patří do vltavské kaskády. Rozloha její nádrže je asi 50 km², čímž je největším uměle vytvořeným jezerem u nás. Obsah nádrže je určen k regulaci odtoku. To znamená, že při nízkém průtoku dojde k jeho zvýšení, naopak při vysokém průtoku (např. při povodních) dochází k jeho redukci (omezení povodňových špiček). Vodu zadržuje kombinovaná vodní hráz o výšce 26 m. Kaverna, v níž je vodní elektrárna Lipno I postavena, se nachází u hráze v hloubce 160 m. Voda z nádrže proudí na turbíny skrze dvě ocelové šachty o průměru 4,5 m a délce 160 m. Před turbínami jsou umístěny kulové uzávěry. Odvod vody je zajištěn podzemním odpadním tunelem dlouhým 3,6 km, širokým 8,4 m a vysokým 7,8 m. Doprava technologického zařízení a personálu do kaverny probíhá tunelem, který má sklon 45°, šířku 6,8 m, výšku 9,7 m a délku 200 metrů.



1. Hráz Lipenské přehrady.
2. Rozvodna elektrické energie.
3. Komora kulových uzávěrů.
4. Podzemní hala s dvěma generátory o výkonu 2x60 MW.
5. Podzemní kaverna VE Lipno I.
6. Šikmá šachta nákladního výtahu.

Obr. 3.1: Schéma vodní elektrárny Lipno [9]

Vodní elektrárna Lipno byla uvedena do provozu v roce 1959. V podzemní kaverně jsou umístěna dvě soustrojí osazené Francisovými turbínami, jejichž provoz je plně automatizovaný. Instalovaný výkon turbín je 2x60 MW. Elektrická energie vyrobená generátory o velikosti 15 kV je vyváděna do nadzemních transformátorů a rozvodny tunelem pomocí kabelů. V areálu je také umístěna rozvodna 22 kV, která je zdrojem elektrické energie pro rozsáhlé okolí.

3.1.2 Lipno II

Nedílnou součástí vodní elektrárny Lipno I je průtočná vodní elektrárna Lipno II, která je vybavena jednou Kaplanovou turbínou s instalovaným výkonem 1,5 MW a spádem 10–4 m. Slouží hlavně k vyrovnávání odtoku z Lipno I.

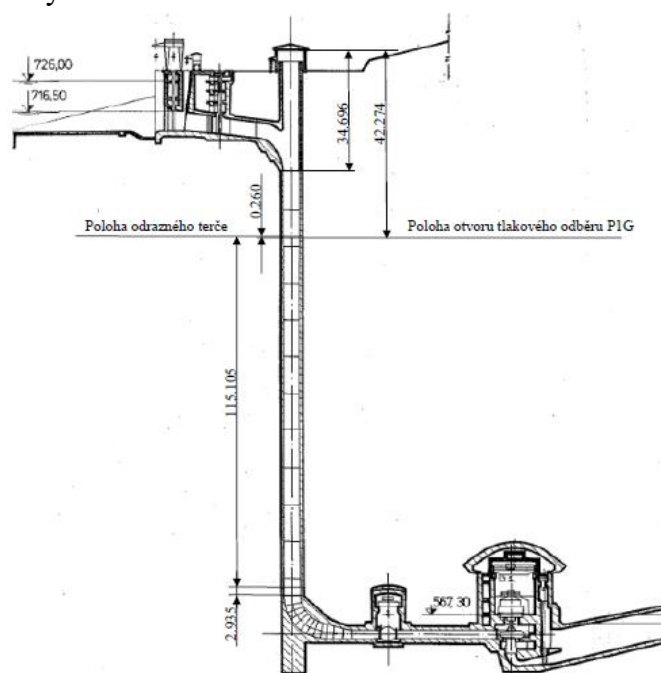
Na řece byla vybudována 11,5 m vysoká kombinovaná hráz, za níž se nachází nádrž o obsahu 1,68 mil.m³ vody. Na přehradě je umístěno hydrotechnické zařízení, které ovládá hráz a řídí tak odtok. Ten je potřeba řídit zejména při opravách či údržbě soustrojí vodní elektrárny. Řízení vodní elektrárny Lipno II probíhá bezobslužně z dispečinku ve Štěchovicích nebo z elektrárny Lipno I a její chod je plně automatizovaný. Hlavní energetický význam Lipna II je umožnění špičkového provozu elektrárně Lipno I. Vodní elektrárna Lipno II byla uvedena do provozu v roce 1957.



Obr. 3.2: Vodní elektrárna Lipno II [10]

3.2 Měřicí trať

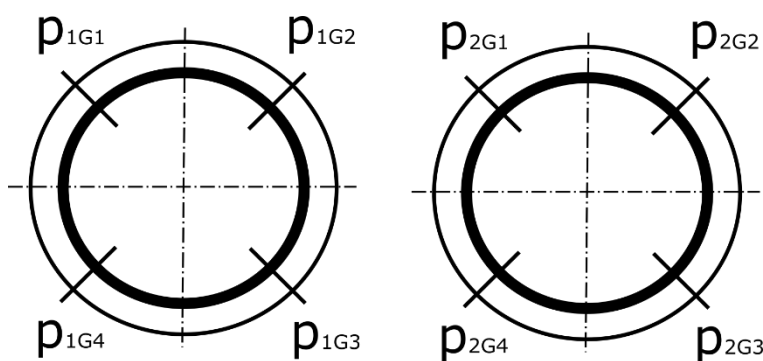
Na obr. 3.3 je zobrazené schéma přivaděče vodní elektrárny Lipno I s vertikálními délkami jednotlivých segmentů. Tyto délky byly měřeny z obslužné plošiny laserem vzhledem k odrazovému terči, který byl magneticky připevněn na stěně přivaděče a vzhledem ke stropu obslužné výtahové šachty.



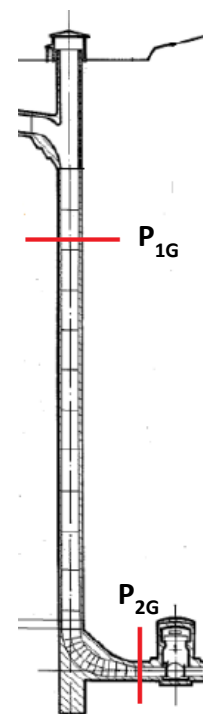
Obr. 3.3: Geometrie přivaděče

Česle, umístěny před vstupem do přivaděče, slouží k odstranění hrubých nečistot, které mohou poškodit turbíny. Voda pak proudí vertikálním potrubím o průměru 4,5 m pod povrch až na úroveň kaverny, kde se nachází koleno usměřující proud doprava. Na koleno navazuje mírné zúžení průřezu na průměr 2,5 m a kulový uzávěr, který reguluje průtok na turbíny. Vpravo dole je vidět kaverna se dvěma Francisovými turbínami (viz obr. 3.3).

Veškeré rozměry se vztahují k poloze odrazného terče. Tlaky byly měřeny v místě P_{1G} čili v poloze odrazného terče a pak po zúžení těsně před kulovým uzávěrem v místě P_{2G} (viz obr. 3.5). V obou místech jsou umístěny celkem čtyři tlakoměry rozmístěny rovnoměrně po průřezu. Rozložení tlakových snímačů je názorně vidět na obr. 3.4.



Obr. 3.4: Rozmístění snímačů v průřezu

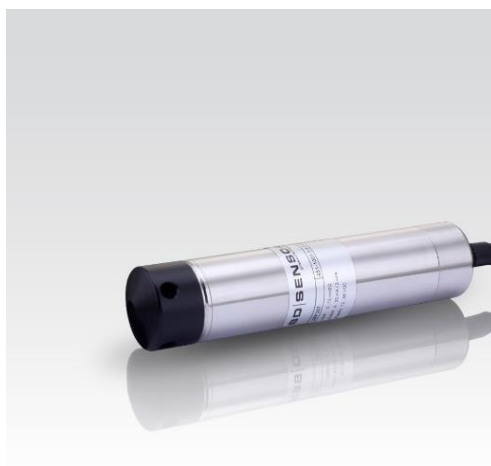


Obr. 3.5: Místa tlakových odběrů

3.3 Měření tlaku [11] [12] [13] [14] [15]

Měření bylo provedeno společností OSC, a.s., která má mimo jiné divizi zaměřující se na měření vodních elektráren nejen v rámci Evropy ale i celosvětově. Společnost vznikla v září roku 1994 pod názvem ORGREZ SC, a.s. a v roce 1999 se majoritním akcionářem stala společnost ČEZ a.s. Téhož roku došlo ke změně názvu na OSC, a.s.

K měření tlaku na VE Lipno I byly použity dva typy tlakových snímačů od firmy BD Sensors s piezorezistivním principem měření. Prvním typem je ponorná tlaková sonda LMP 307 (viz obr. 3.6) vyrobená z nerez, která má uvnitř vlastní tlakové čidlo. Tlak je měřen polovodičovými tenzometry v nerezovém obalu s navařenou nerezovou oddělovací membránou a náplní inertního oleje. Hydrostatický tlak daný výškou hladiny způsobí rozvážení tenzometrického můstku průhybem měřicí membrány. Tyto sondy byly umístěny v místě odběru P_{1G} (viz obr. 3.5), rozloženy v průřezu podle obrázku 3.4 vlevo. Primárně je tento tlakový senzor určen ke kontinuálnímu měření výšky hladiny vody. Předností těchto ponorných sond je miniaturní konstrukce (malý průměr 27 mm), nízká chyba měření vlivem teploty, vysoká přesnost a dlouhodobá stabilita. Pro standardní provedení je rozsah napájení dvou vodičů 4-20 mA a tlakový rozptyl 200-450 kPa. Přesnost měření touto ponornou sondou je asi 0,25 %. Sondy jsou umístěny v držácích a ochranných trubkách na začátku svislé části přivaděče (umístění terče P_{1G}). Obrázek ponorné sondy typu LMP 307 je umístěn na následující straně.



Obr. 3.6: Ponorná sonda typu LMP 307 [14]

Druhým použitým typem tlakových senzorů od firmy BD Sensors jsou snímače typu DMP 331 (viz obr. 3.6). Jsou vhodné jak pro statické, tak i dynamické měření tlaku. Nerezové tlakové čidlo je ukotvené v pouzdře pomocí O-kroužku s navařenou oddělovací membránou a s náplní tvořenou inertním olejem. Působením tlaku dochází uvnitř tlakového snímače k vytvoření výstupního elektrického signálu polovodičovým čidlem. Tento signál je dále teplotně kompenzován a vestavěnou elektronikou dále upraven (zesílen a normován). Tlakové čidlo a elektronika jsou uloženy v nerezovém pouzdře. Tyto snímače slouží k měření relativního a absolutního tlaku. V přivaděči se nacházejí v místě P_{2G} (viz obr. 3.5) těsně před kulovým uzávěrem rozmístěny po průřezu dle obrázku 3.4 vpravo. Výhodou snímačů DMP 331 je dlouhodobá stabilita a nízká chyba způsobená vlivem teploty. Provedení snímače s dvěma vodiči má proudový rozsah výstupního signálu 4-20 mA a rozptyl měřených tlaků 0-2,5 MPa. Přesnost měření těmito tlakovými senzory je 0,1/ 0,2/ 0,25 %, liší se podle daného typu. Výstupem z tlakoměrů jsou hodnoty tlaku v průřezích P_{1G} a P_{2G} , jenž ohraničují měřenou část



Obr. 3.7: Tlakový snímač typu DMP 331 [15]

přivaděče. V tabulce na následující straně jsou první dva kroky datového záznamu. Z tabulky je vidět, že v prvním průřezu jeden z tlakoměrů neměřil. Z neznámého důvodu nezaznamenával hodnoty tlaků a kvůli špatné dostupnosti zatím nebyl opraven.

t [s]	P_{1G1} [kPa]	P_{1G2} [kPa]	P_{1G4} [kPa]	P_{2G1} [kPa]	P_{2G2} [kPa]	P_{2G3} [kPa]	P_{2G4} [kPa]
86,651	317,52	316,406	316,777	1561,377	1568,164	1538,525	1547,266
86,659	317,441	316,504	316,582	1560,205	1567,48	1538,623	1547,363

Tab. 3.1: Tlakový záznam přímo ze snímačů

Prvním krokem ve vyhodnocení průtoku metodou tlak-čas je výpočet tlakové diference. Nejprve je nutné vypočítat celkovou hodnotu tlaků v každém z průřezů jako průměr naměřených hodnot dle rovnic:

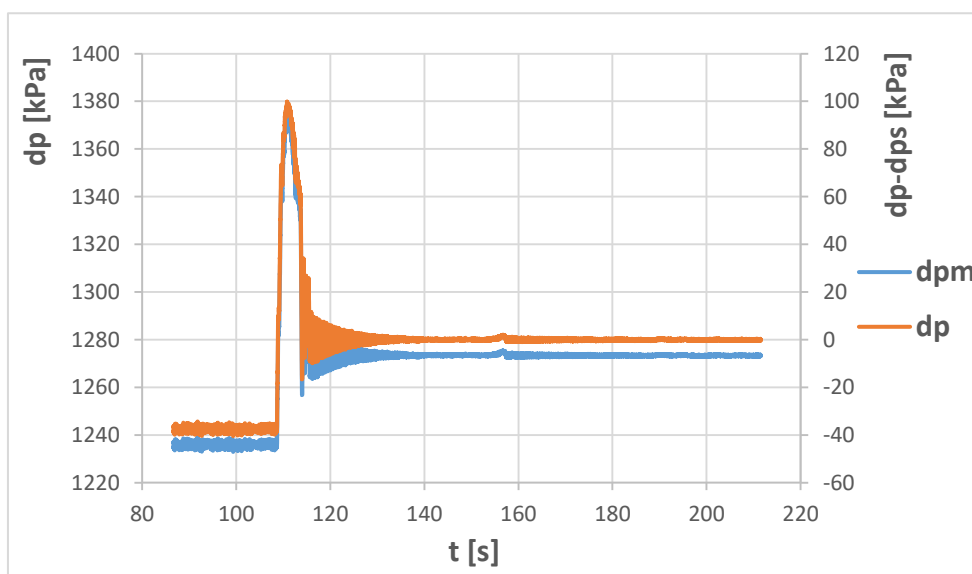
$$p_{1G} = \frac{p_{1G1} + p_{1G2} + p_{1G4}}{3} \quad (3.1)$$

$$p_{2G} = \frac{p_{2G1} + p_{2G2} + p_{2G3} + p_{2G4}}{4} \quad (3.2)$$

Z celkových tlaků v průřezech se spočítá naměřený tlakový rozdíl dp_m v daném úseku přivaděče pro každý časový krok podle následující rovnice:

$$dp_m = p_{2G} - p_{1G} \quad (3.3)$$

Celkový tlakový rozdíl dp se vyhodnocuje tak, že se od naměřené tlakové diference odečte průměrná hodnota tlaků dp_m , při které je předpokládán nulový průtok (jedná se o statickou hodnotu tlaku značenou dp_s). V tomto případě byl počítán jako průměr hodnot od 180. do 212. s viz graf 3.1 a tab. 3.2.



Graf 3.1: Průběh naměřené a spočítané tlakové diference

Z grafu 3.1 jde vidět průběh tlaků při vzniku vodního rázu a jeho následného dokmitávání. Měření probíhalo od 86. s, kdy voda proudila konstantním průtokem. Kolem 110. s došlo k zavírání rozvaděče a kulového ventilu, což vedlo k nárůstu hodnoty tlaku na téměř 1380 kPa. Poté tlak klesl vlivem vodního rázu, protože kapalina proudila opačným směrem. Kapalina dále dokmitávala až k nulové hodnotě kolem 140. s. Úplné dovření kulového ventilu se na obr. 3.1 projevilo malým zakolísáním tlaku před 160. s.

dp_s (dp_m při $Q=0$) [kPa]	t_1 [s]	180	=	1273,408
	t_2 [s]	212		

Tab. 3.2: Stanovení statické tlakové difference

$$dp = dp_m - dp_s \quad (3.4)$$

Poté mohla být dopočítána tlaková difference dp jako rozdíl naměřené tlakové difference dp_m a statické hodnoty dp_s dle vztahu (3.4). Konečné zpracování tlakového záznamu je zobrazeno v tab. 3.3 a vykresleno v grafu 3.1, kde modrá křivka reprezentuje původní naměřenou tlakovou diferencí a oranžová reprezentuje vypočtenou hodnotu dp , se kterou se dále pracuje.

t [s]	dp_m [kPa]	dp [kPa]
0	1236,932	-36,476
0,008	1236,576	-36,832

Tab. 3.3: Výsledné zpracování tlakového záznamu

3.4 Vyhodnocení nestacionárního průtoku v programu MS Excel

Aby mohla být použita rovnice (1.13) pro výpočet nestacionárního průtoku v programu MS Excel, musela se upravit diskretizací proměnných, kdy bylo spojitě řešení nahrazeno posloupností diskretních bodů. Využitím Eulerovy metody jde pak nový stav stanovit z předcházejícího. [16]

Rovnice vycházející ze vztahu (1.13) má po úpravě tvar:

$$\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta t} = -\frac{1}{P_f \rho} (\Delta p_i + R|Q_i|Q_i) \quad (3.5)$$

kde Q_i je průtok závislý na čase t_i , Δp_i je tlaková difference v čase t_i .

Poslední úpravou je vyjádření nestacionárního průtoku následujícího kroku Q_{i+1} z rovnice (3.5):

$$Q_{i+1} = Q_i - \frac{\Delta t}{P_f \rho} (\Delta p_i + R|Q_i|Q_i) \quad (3.6)$$

kde Q_{i+1} je průtok následujícího kroku, Q_i je průtok stávajícího kroku (na počátku je to průtok Q_0), Δt je časový krok spočítaný jako rozdíl časů následujícího a stávajícího kroku, P_f je Penstock faktor, který vyjadřuje vliv geometrie přivaděče a ρ je hustota proudícího média.

Penstock faktor P_f byl spočítán z naměřených hodnot geometrie přivaděče VE Lipno I dle rovnice (1.8). Vyjadřuje změnu velikosti průřezu po délce zkoumané části potrubí.

$$P_f = \int_{P_{1G}}^{P_{2G}} \frac{dL}{S} = 10,896 \text{ m}^{-1}$$

Ve výpočtu byla uvažována hustota odpovídající hustotě vody:

$$\rho_{\text{vody}} = 999,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Průběh výpočtu:

1. Nastavení počátečního průtoku Q_0 (zcela libovolně), od kterého se bude odvíjet výpočet průtoku pro každý další časový krok.
2. Výpočet odporového součinitele R podle odvozeného vztahu (1.15), kde Δp se spočítá jako průměr hodnot vypočtené tlakové difference dp při průtoku $Q = Q_0$ pro konkrétní časový interval, který je zobrazen v tabulce 3.4.

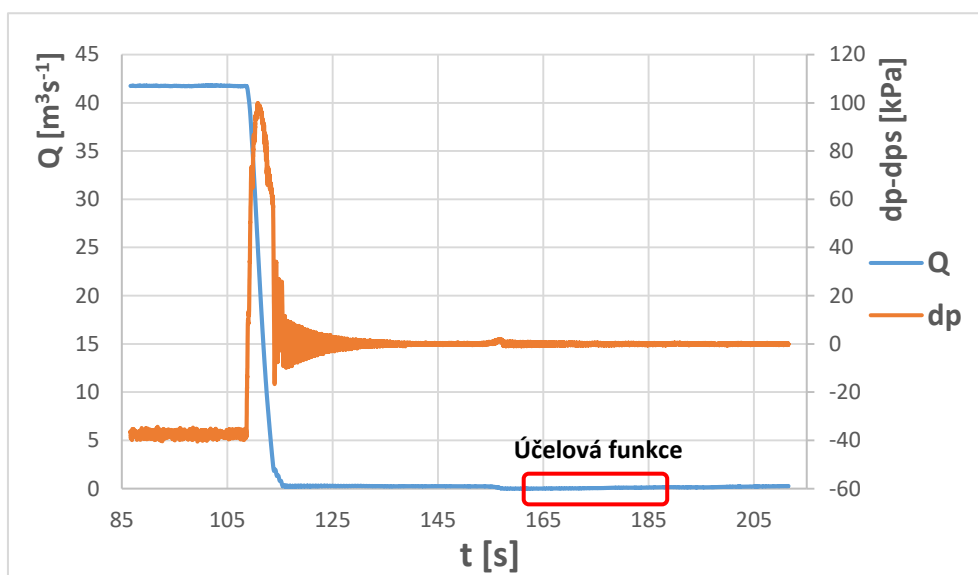
dp (při $Q=Q_0$) [kPa]	t_1 [s]	86	=	-37,560
	t_2 [s]	108		

Tab. 3.4: Vyhodnocení tlakové difference dp pro výpočet odporového součinitele R

3. Výpočet průtoku ve zvolených mezích (t_0, t_k) , kde je požadována nulová hodnota průtoku v konečném čase t_k .
4. Jestliže na konci integrace nebylo dosaženo nulového průtoku, tak došlo k úpravě průtoku počátečního (bod 1) a přepočítání dle rovnice (3.6)

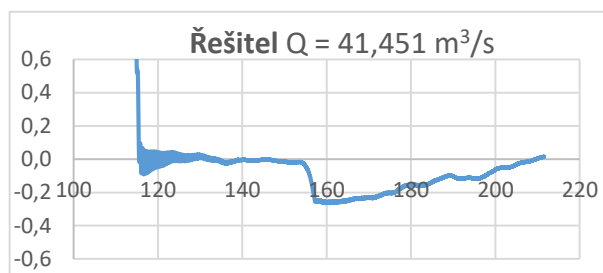
t [s]	dp_m [kPa]	dp [kPa]	Q [m ³ s ⁻¹]	Proměnná
0,000	1236,932	-36,476	41,750	
0,008	1236,576	-36,832	41,74949	

Tab. 3.5: Vyhodnocení průtoku



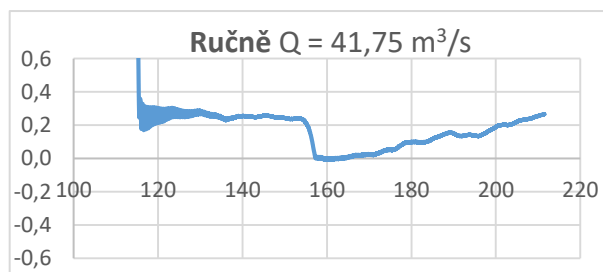
Graf 3.2: Přeprůtok prvotního průtoku pomocí Řešitele

Výpočet byl realizován automatickou numerickou metodou pomocí Řešitele zahrnutém v tabulkovém programu MS Excel. Řešiteli byla zadána proměnná jako prvotně zvolený průtok Q_0 (viz červený rámeček v tab. 3.5), který měnil tak, aby účelová funkce (viz červený rámeček v grafu 3.2), čili průměr hodnot průtoku mezi 165. až 185. s, byl nulový. Výpočty dalších měření byly spočteny analogicky. V grafu 3.2 je vidět křivka vyhodnoceného průtoku Řešitelem (modrá) a průběh vypočtené tlakové difference (oranžová).



Graf 3.3: Detail průběhu průtoku z grafu 3.2

Z detailu průběhu průtoku (viz graf 3.3) vyhodnocené pomocí Řešitele jde vidět, že křivka před 160. s klesne do záporných hodnot průtoků. Tento pokles značí úplné dovření kulového uzávěru, kdy má být průtok nulový. Křivku je tak nutné ručně zvednout zvýšením počátečního průtoku Q_0 v rádech desetin či setin, aby dosedla na časovou osu (osu x) viz graf 3.4.



Graf 3.4: Detail úpravy vyhodnoceného průtoku

Z grafu 3.4 je vidět ideální průběh výsledného průtoku. Dovření kulového uzávěru je přesně na nulové hodnotě průtoku. Ze záhlaví grafů 3.3 a 3.4 je patrné, že počáteční průtok vyhodnocený Řešitelem se od ručně upraveného liší o přibližně $0,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Výsledný průtok pro tohle měření je tedy $Q_0 = 41,75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

4 VLIV KINETICKÉHO ČLENU PŘI VÝPOČTU PRŮTOKU

Dalším úkolem při zpracování této diplomové práce bylo ověřit vliv kinetického členu při výpočtu průtoku metodou tlak-čas, který je zvýrazněn červeným rámečkem ve zkopírované rovnici (1.9) pod tímto odstavcem. Tento člen vyjadřuje změnu kinetické neboli pohybové energie mezi dvěma průřezy potrubí. Standardní odvození probíhá obdobně jako je tomu v úvodu této práce za předpokladu, že bude rozdíl průřezů potrubí malý, tedy se bude blížit k nule, tak kinetický člen může být zanedbán. Ze vztahu (1.9) je tedy nutné si znovu odvodit vztah pro průtok Q a odporový součinitel R .

$$P_f \rho \frac{\partial Q}{\partial t} = -\Delta p_z - \Delta p - \rho \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right)$$

Dále za změnu tlaku způsobenou hydraulickými ztrátami Δp_z dosadíme ze vztahu (1.11) a dostaneme následující rovnici:

$$P_f \rho \frac{\partial Q}{\partial t} = -R|Q(t)|Q(t) - \Delta p - \rho \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) \quad (4.1)$$

Úpravou rovnice (4.1) ji lze vyjádřit v diferenciálním tvaru:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0 = - \frac{\Delta p + R|Q(t)|Q(t) + \rho \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right)}{\rho P_f} \quad (4.2)$$

Rovnici lze položit rovnu nule za předpokladu nulové změny průtoku v čase (tedy při ustáleném proudění před zavíráním). Poté z rovnice jde odvodit vztah pro odporový součinitel R ve tvaru:

$$R = - \frac{\Delta p + \rho \frac{Q_0^2}{2} \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right)}{Q_0|Q_0|} \quad (4.3)$$

Vyhodnocení metodou tlak-čas je pak úplně stejné, jen se pro výpočet průtoku použije vztah (4.2) a pro výpočet odporu vztah (4.3). Průměry D_1 a D_2 byly určeny z protokolu měření na Lipně jako průměr tří naměřených hodnot. Jejich konkrétní hodnoty jsou v následující tabulce:

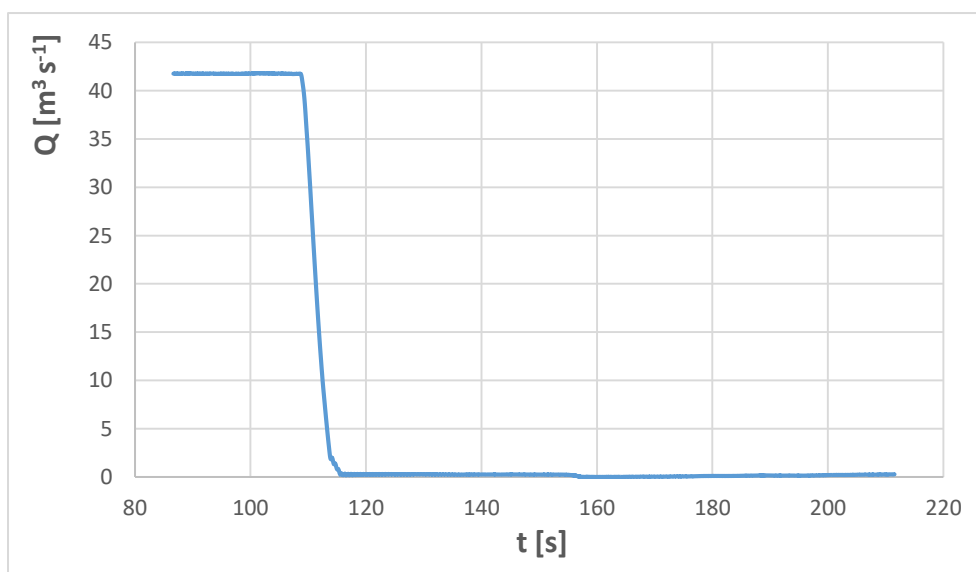
D_1 [m]	D_2 [m]	S_1 [m ²]	S_2 [m ²]
4,5025	2,494333	15,92199	4,886511

Tab. 4.1: Vstupní hodnoty

Potvrdilo se, že vliv kinetického členu je téměř nulový. Vypočtený průtok Q_k dle rovnic, ve kterých je kinetický člen uvažován, se od předešlého průtoku Q liší v řádech tisícin, což je zanedbatelná hodnota. Výsledek je vidět v tabulce 4.2.

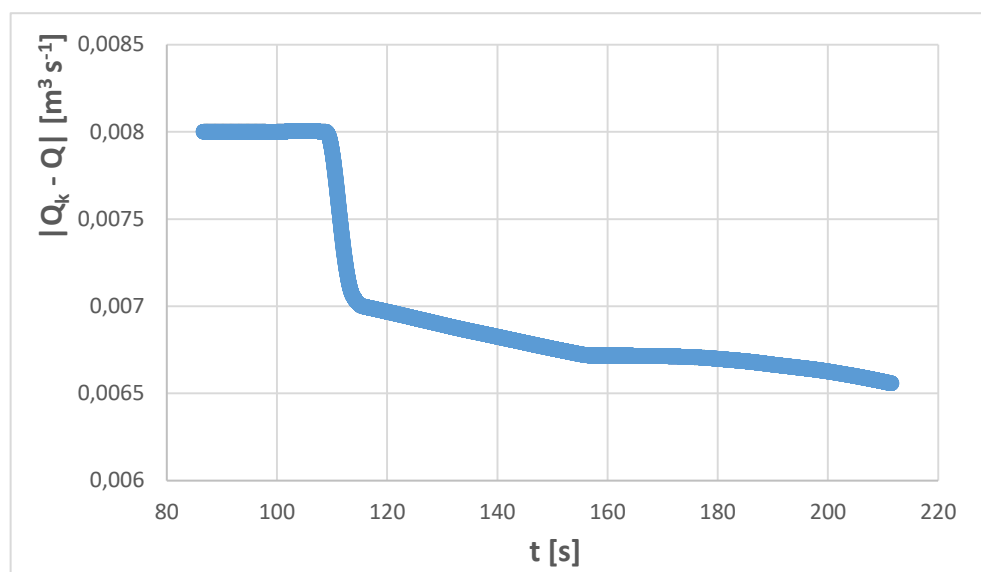
Q [m ³ s ⁻¹]	Q_{kin} [m ³ s ⁻¹]	Odchylka [m ³ s ⁻¹]	Odchylka [%]
41,750	41,758	0,008	0,019162

Tab. 4.2: Vypočtený průtok



Graf 4.1: Průběh vypočteného průtoku Q_k

Výsledný průběh průtoku je téměř totožný s vypočteným průtokem, kde byl zanedbán vliv kinetického členu. Průběh absolutní odchylky, tedy rozdílu $|Q_k - Q|$, je znázorněn v grafu 4.2.



Graf 4.2: Závislost odchylky průtoku na čase

Z grafu 4.2 je patrné, že nejvyšší odchylka je při stacionárním počátečním průtoku přibližně $0,008 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, což odpovídá chybě asi 0,02 %. Poté došlo vlivem zavírání k jejímu poklesu. Při nulovém průtoku se odchylka pohybovala kolem $0,0067 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

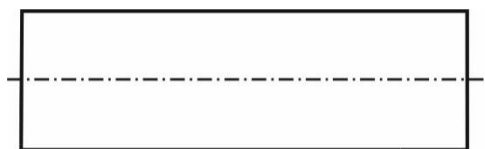
Vliv kinetického členu se téměř neprojevil. Pokud bude provedeno vyhodnocení průtoku metodou tlak-čas se zanedbáním tohoto členu, tak se výsledek v řádech desetin nijak nezmění. Chyba vnesena do výpočtu bude kolem dvou setin procenta.

5 CFD VÝPOČET A VYHODNOCENÍ PENSTOCK FAKTORU

Penstock faktor neboli součinitel potrubí je definován jako míra vlivu geometrie přivaděče. Jinak řečeno, jak se mění velikost průřezu v závislosti na délce. Obecně se značí P_f a je definován vztahem (1.8) následovně:

$$P_f = \int_1^2 \frac{dL}{S}$$

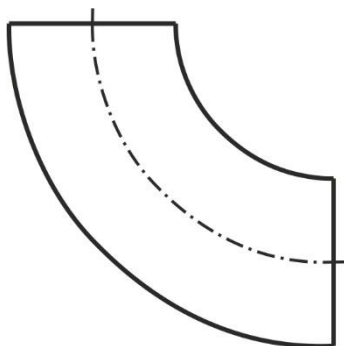
Většinou se počítá podle zjednodušeného vzorce $\frac{L}{S}$, přičemž dosazené hodnoty jsou měřeny ručně přímo v přivaděči, na kterém se poté vyhodnocuje průtok metodou tlak-čas. Naměřené délky přivaděče zavádějí do výpočtu Penstock faktoru chybu, která způsobuje nepřesnost vyhodnoceného průtoku. Proto součástí této diplomové práce je výpočtové modelování nestacionárního proudění v daných segmentech potrubí ukázaných na obr. 5.1, 5.2 a 5.3. Výstupem numerické simulace je časový průběh tlaků na vstupu a výstupu z každého segmentu a hodnoty průtoku na vstupu. Z těchto hodnot je poté zpětně určen Penstock faktor v MS Excelu pomocí Řešitele.



Obr. 5.1: Přímé potrubí



Obr. 5.2: Kónus



Obr. 5.3: Koleno

Po konzultaci bylo přistoupeno ke 2D výpočtům u přímého potrubí a zúžení z důvodu časové náročnosti nestacionárních výpočtů u třídízenčních modelů. Dalším zjednodušením, čímž se zkrátil čas výpočtu, bylo řešení domény jako osově symetrické neboli axisymetrické. Koleno nebylo možné řešit ve 2D, protože rozložení tlaků ve výstupním průřezu není symetrické vlivem odtržení proudu od vnitřní strany a natlačení na stěnu vnější. Modelování a simulace bylo provedeno v programech komerčního softwaru ANSYS 17.2.

5.1 Rozbor úlohy

Úloha byla navržena jako výpočet proudění v přivaděči, ve kterém byl zakomponován kónus nebo koleno. Geometrie přivaděče odpovídá velikostem přivaděče na VE Lipno I. Simulace proudění byla provedena pro zastavování průtoku z počáteční hodnoty rychlosti ustáleného proudění na nulovou hodnotu, což reprezentovalo úplné uzavření kulového uzávěru. Pro změnu rychlosti byla zvolena funkce cosinus a doba zavírání 5 s.

Takto zvolený typ výpočtu simuluje průběh měření tlaků v přivaděči na velkých vodních dílech, kdy například kulovým uzávěrem dochází ke snižování průtoku před turbínou až do úplného zavření, v jehož důsledku dojde k hydraulickému rázu. Dalším výstupním parametrem simulace je průběh průtoku v každém časovém okamžiku.

Vyhodnocení Penstock faktoru bylo provedeno v programu MS Excelu pomocí Řešitele. Vzhledem k tomu, že z Fluentu jsou známé hodnoty průtoku, tak je možné metodou tlak-čas zpětně určit Penstock faktor.

5.2 Geometrie a nastavení výpočtu

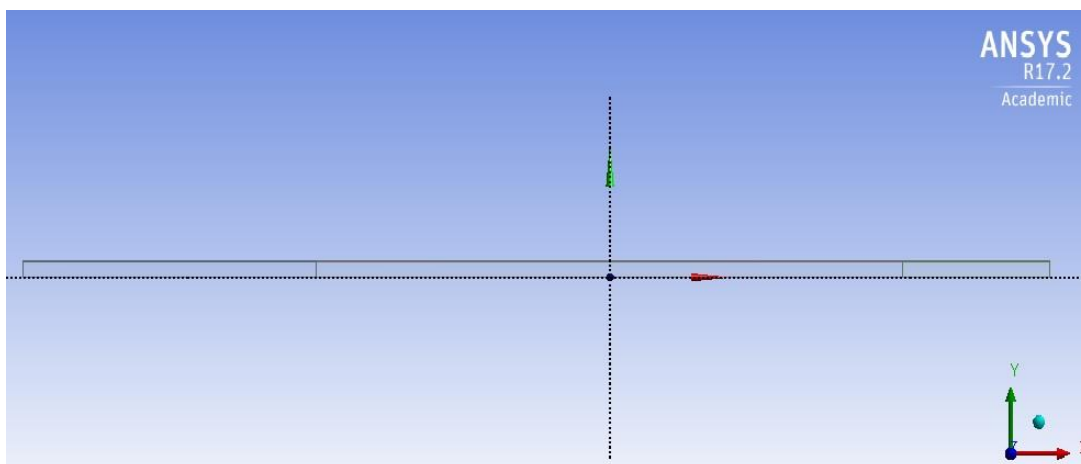
Geometrie všech segmentů zakomponovaných do přivaděče byla vytvořena po vzoru měřeného přivaděče na vodní elektrárně Lipno I. Snahou bylo vymodelovat segmenty v potrubí tak, aby jejich rozměry odpovídaly realitě.

5.2.1 Geometrie jednotlivých výpočtových domén

Vytvoření geometrie výpočtové domény a její dekompozice byla provedena v programu Ansys Design Modeler. Rozdělení výpočtové domény napomáhá ke snazšímu vytvoření výpočetní sítě. Výpočtové domény v případě rovného potrubí a kónusu byly rozděleny na tři základní části, což je vidět na obr. 5.4 a obr 5.5. Dekompozice kolena je z důvodu 3D přístupu složitější.

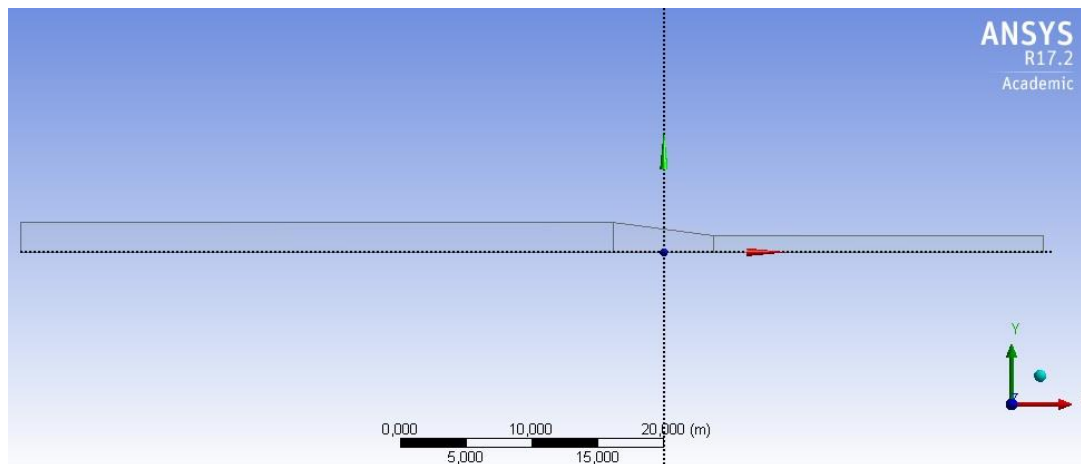
Výsledné modely jsou na obrázcích 5.4, 5.5 a 5.6, kde přímé potrubí (obr. 5.4) bylo modelováno za účelem ověření vhodnosti přístupu k výpočtu. U všech částí potrubí kapalina vstupuje vždy z levé strany výpočtové domény. Ke každému z modelů bylo přidáno přírodní a odtokové potrubí, aby se ve výpočtu neprojevil vliv okrajových podmínek a aby se před vstupem do zkoumaného segmentu potrubí plně vyvinul rychlostní profil.

Geometrie přímého potrubí je navržena na výchozí průměr $D = 4,5$ m a délku zkoumané části potrubí 90 m. Délka přírodního potrubí byla stanovena na desetinásobek průměru potrubí tj. 45 m a odtokové potrubí bylo stanoveno na pěti násobek průměru potrubí tj. 22,5 m. Z obr. 5.4 je patrné, že geometrie má 2D charakter a červená osa x je osou rotace.



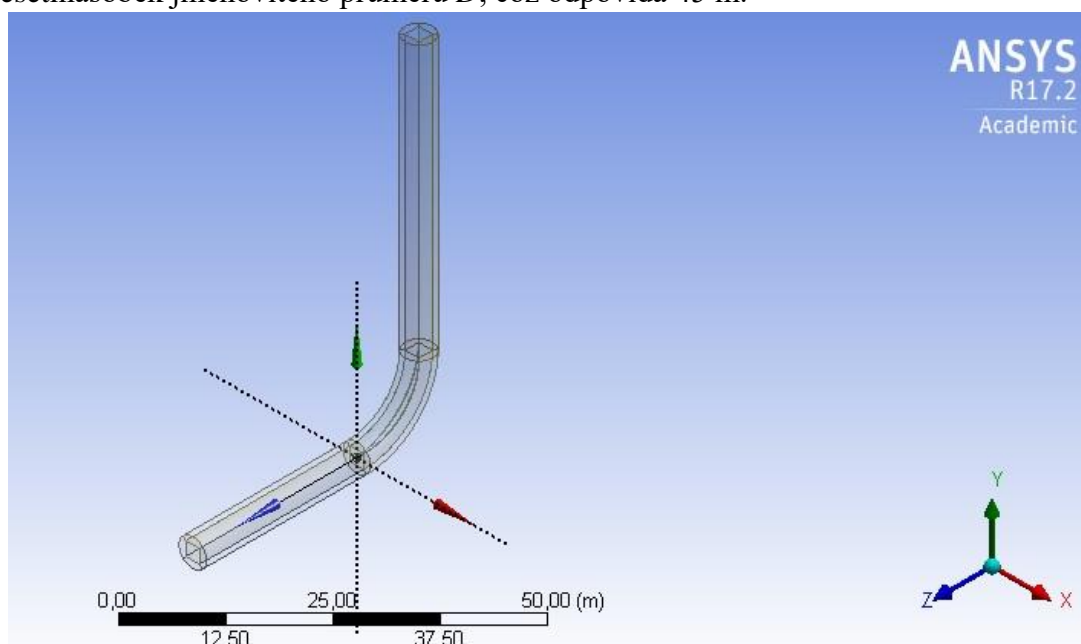
Obr. 5.4: Dekompozice výpočtové domény přímého potrubí

Kónus zužující průřez potrubí z průměru $D_1 = 4,5$ m na průměr $D_2 = 2,5$ m má délku 7,6 m. Délka přívodního potrubí byla stanovena na desetinásobek průměru D_1 tj. 45 m a délka odtokového potrubí byla stanovena také na desetinásobek ale průměru D_2 tj. 25 m. Geometrie kónusu byla řešena obdobně jako u prvního případu přímého potrubí. Měla také 2D charakter a osou rotace je rovněž červená osa x (viz obr. 5.5).



Obr. 5.5: Dekompozice výpočtové domény kónusu

Jak již bylo výše zmíněno, tak jediným možným přístupem k výpočtu proudění v kolenu bylo prostorové řešení. Potrubí má konstantní průměr $D = 4,5$ m. Rozměry kolena odpovídají kolenu vyskytujícímu se v přivaděči VE Lipno I. Rádus $R = 10,203$ m byl vypočten ze známé délky střednice kolena, která byla určena z reálného měření v přivaděči Lipna. Z obr. 5.6 je vidět, jak byl rozdělen průřez skrze celou doménu za účelem vytvoření dobré sítě s ohledem na úsporu prvků ve středu potrubí a zhuštění směrem ke stěnám. Přívodní potrubí, nacházející se vlevo, má délku odpovídající šestinásobku jmenovitého průměru D tj. 27 m. Odtokové potrubí, směřující nahoru ve směru osy y, je vzhledem k trhání proudu z vnitřní stěny kolena stanoveno na desetinásobek jmenovitého průměru D , což odpovídá 45 m.

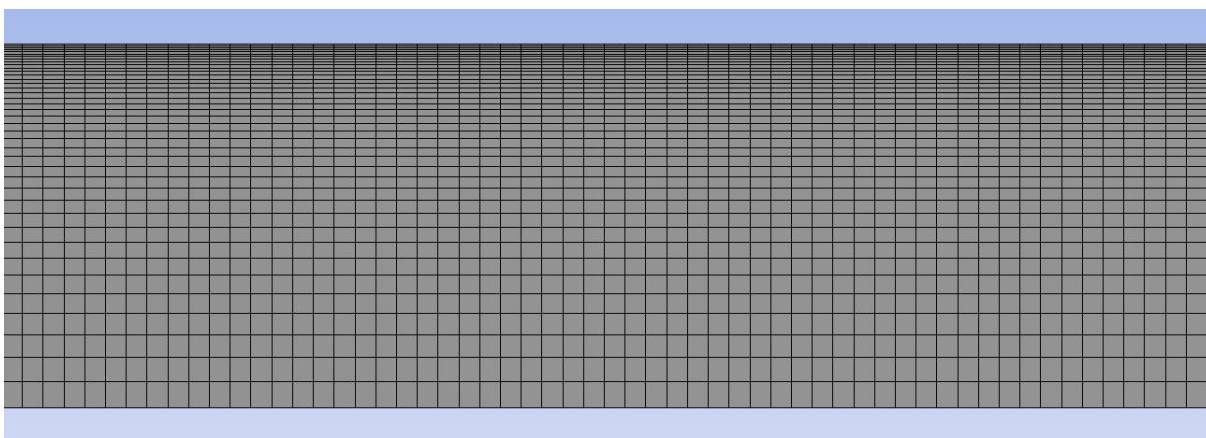


Obr. 5.6: Dekompozice výpočtové domény kolena

5.2.2 Výpočtové sítě

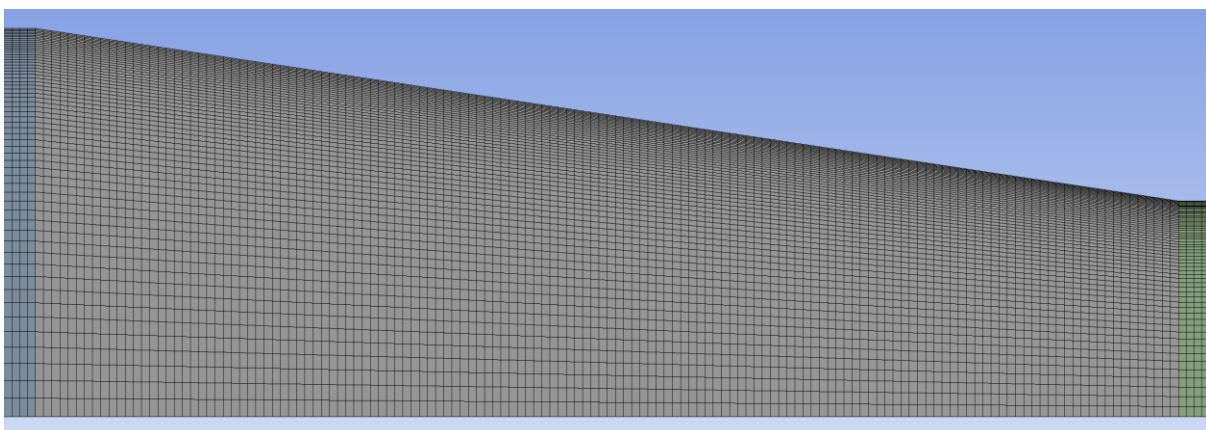
Síť byla vytvořena v programu Ansys Meshing. Dekompozice všech zkoumaných prvků potrubí umožňovala vytvořit strukturovanou síť skládající se pouze ze čtyřúhelníkových prvků. Každá síť byla vytvořena s ohledem na dané aspect ratio vyjadřující poměr stran čtyřúhelníkových prvků. Standardně je doporučeno držet hodnotu aspect ratio menší než 5. V přírodním a odtokovém potrubí byla síť zhušťována směrem ke zkoumanému prvku potrubí.

U přímého potrubí nebylo vytvoření sítě nijak náročně. Byl kladen důraz na dostatečné zhuštění prvků směrem ke stěnám potrubí v takovém množství, aby se při výpočtu hodnota y^+ nacházela v rozmezí 20 – 120 pro zvolenou stěnovou funkci. Hodnota y^+ vypovídá o příčné vzdálenosti první řady prvků od stěny. Aby nebyl výpočetní čas příliš dlouhý tak výpočetní síť byla u osy symetrie poměrně hrubá, což vedlo ke snížení celkového počtu prvků (viz obr. 5.7).



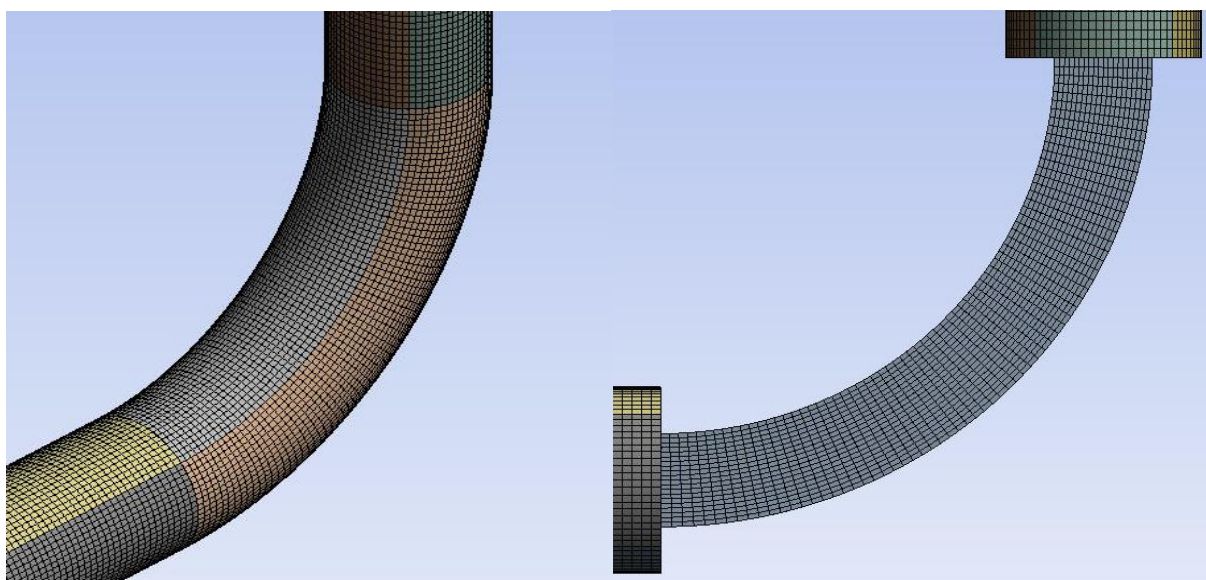
Obr. 5.7: Detail výpočtové sítě přímého potrubí

Síť vytvořená pro výpočet kónusu byla koncipována stejně jako u přímého potrubí a je zobrazena na obr. 5.8. Vzhledem k malé délce kónusu bylo nutné v této oblasti zjemnit síť v podélném směru, aby nebyla hodnota aspect ratio příliš vysoká.



Obr. 5.8: Detail výpočtové sítě v oblasti zúžení průřezu

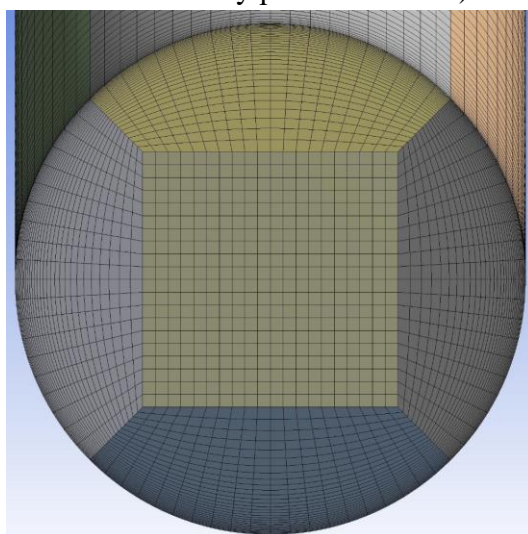
Jelikož koleno bylo modelováno ve 3D, tak tvorba sítě byla náročnější, a to jak z pohledu času potřebného k jejímu vytvoření, tak i z pohledu použitého množství prvků. Z pohledu kvality sítě tak bylo přihlíženo ke stejným kritériím jako v předchozích případech, což znamená zachování potřebné hodnoty y^+ a dostatečného zhuštění prvků směrem ke stěně, aby nebyla vysoká hodnota kritéria y^+ . Na obrázcích 5.9, 5.10 a 5.11 je vidět, že síť se skládala pouze ze čtyřúhelníkových prvků.



Obr. 5.9: Výpočtová síť v oblasti kolena

Obr. 5.10: Detail výpočtové sítě vnitřní části potrubí v oblasti kolena

Na obr. 5.11 je zobrazena dekompozice průřezu potrubí, která byla provedena za účelem úspory prvků sítě, čímž se zkrátil i výpočetní čas. Síť je u stěny velmi jemná, což ale stále nestačilo k dosažení potřebné hodnoty y^+ . Proto bylo ve Fluentu využito funkce adaptace sítě, která rozdělí první řadu buněk u stěny na čtyři menší prvky. Adaptaci sítě je doporučeno aplikovat maximálně dvakrát. Další adaptace se už nedoporučují, protože síť by byla velmi nekonformní (prvky by na sebe nenavazovaly přesně v uzlech).



Obr. 5.11: Detail dekompozice průřezu

5.2.3 Nastavení výpočtu

CFD výpočet byl uskutečněn v programu Fluent verze 17.2. Nejprve byla každá z úloh počítána stacionárně, aby se dostatečně vyvinul rychlostní profil, a poté byl výpočet přepnut na nestacionární. Všechny výpočty byly nastaveny totožně tak, že nejprve bylo provedeno 5 s výpočtu s konstantní hodnotou rychlosti, poté se rychlost snižovala podle předepsané funkce pomocí UDF k nule, a nakonec bylo dopočítáno 10 sekund s nulovou hodnotou rychlosti.

Časový krok výpočtu

Pro výpočet přímého potrubí a kónusu byl časový krok v první a třetí fázi tj. 0 až 5 s a 10 až 20 s $\Delta t = 0,01$ s. V časovém rozmezí 5 až 10 s docházelo ke snížení rychlosti proudění, což vyžadovalo zmenšení časového kroku na $\Delta t = 0,001$ s z důvodu lepší konvergence úlohy a podchycení dynamických jevů.

3D výpočet kolena byl proveden v první a třetí fázi s časovým krokem $\Delta t = 0,1$ s. Mezi 5. až 10. s byl časový krok zmenšen na $\Delta t = 0,01$ s za účelem docílení dobré konvergence úlohy v časovém intervalu, kde docházelo k pozvolnému snížení rychlosti až na nulovou hodnotu.

U nestacionárních výpočtů byl nastaven pro dané časové intervaly odlišný počet iterací na jeden časový krok, aby byla chyba výpočtu co nejmenší.

Zvolený model turbulence

CFD výpočty vycházejí z řešení Reynoldsovsky středovaných Navier-Stokesových rovnicích (RANS). Jelikož se v těchto rovnicích objevuje příliš mnoho neznámých, tak se zavádějí modely turbulence. Pro výpočet všech úloh byl zvolen dvourovnicový model turbulence $k-\varepsilon$. Stěny potrubí byly modelovány pomocí nerovnovážných stěnových funkcí.

Diskretizační schémata

Pro všechny počítané úlohy byla diskretizační schémata volena takto:

Gradient – Least Squares Cell Based

Tlak – Second Order

Hybnost – Second Order Upwind

Turbulentní kinetická energie k – Second Order Upwind

Disipace turbulentní kinetické energie ε – Second Order Upwind

Stanovení okrajových podmínek

Okrajové podmínky byly stanoveny pro všechny počítané úlohy stejně.

- Na vstupu domény:

Na vtoku domény (vlevo) byla nastavena rychlostní okrajová podmínka. Ta byla zadána uživatelskou funkcí UDF tak, aby se po páté sekundě výpočtu začala rychlost proudění snižovat. Změna rychlosti byla vyjádřena pomocí funkce cosinus. Polovina periody byla předepsána na 5 s z důvodu hladkého přechodu v čase 5 a 10 s. Počáteční rychlost v_0 byla stanovena na 2,5 m/s, což odpovídá průtoku asi $39,76 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Rovnice definující změnu rychlosti vstupní okrajové podmínky po 5. s výpočtu byla ve tvaru:

$$v = v_0 \frac{1}{2} \{1 + \cos[\omega(t - T_0)]\} \quad (5.1)$$

kde v_0 je počáteční rychlost, ω je úhlová rychlost, t je výpočetní čas a T_0 časová konstanta rovna pěti sekundám.

Úhlová rychlost je vyjádřena v následujícím tvaru:

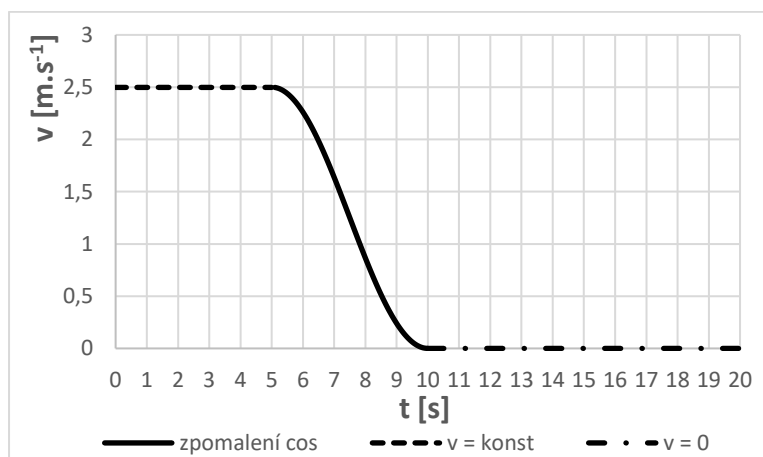
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{10} \approx 0,628318 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.2)$$

kde T je perioda zvolené funkce cosinus, která se rovná deseti sekundám.

Uživatelská funkce předepsaná ve Fluentu vypadala následovně:

```
/*-----*/
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(unsteady_velocity_cos_upl, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        if (t >= 5 && t <= 10)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5*0.5*(1+cos(0.628318*(t-5)));
        else if (t > 10)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
        else
            F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
/*-----*/
```

Průběh změny rychlosti během celého výpočtu vypadal u všech počítaných variant takto:



Graf 5.1: Vstupní okrajová podmínka pro $v = 2,5 \text{ m.s}^{-1}$

- Na výstupu domény:

Na výstupu z výpočetní domény byla nastavena okrajová podmínka s konstantní hodnotou tlaku. Hodnota statického tlaku na výstupu byla předepsána na $p = 0$ Pa. Dalším nastavením výstupní okrajové podmínky byla intenzita turbulentního proudění s hodnotou 5 % u všech počítaných úloh. Hydraulický průměr byl nastaven podle průměru potrubí, na němž je daná okrajová podmínka předepsána (tedy většinou 4,5 m a u kónusu je výstupní tlaková podmínka s hydraulickým průměrem 2,5 m).

- Na stěnách potrubí:

Stěnám potrubí byla ve všech případech předepsána okrajová podmínka typu WALL. Tato podmínka předepisuje na stěně domény nulovou rychlost, což znamená, že na ní dochází k ulpívání kapaliny.

- Na ose rotace (pro 2D úlohy):

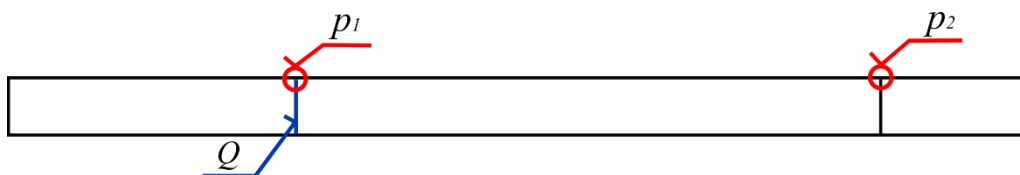
Jedinou odlišnou okrajovou podmínkou byla podmínka AXIS, která náležela ose x u řešení přímého potrubí a kónusu. U těchto případů bylo možné přistoupit k 2D řešení pomocí axisymetrie, jelikož proudění v potrubí je osově symetrické. Tato podmínka značně zjednodušila úlohy jak z pohledu síťování, tak z pohledu časové náročnosti výpočtu.

- Uvažované médium:

Pro všechny výpočty byla proudícím médiem uvažována voda o hustotě $\rho = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a dynamické viskozitě $\eta = 0,001003 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

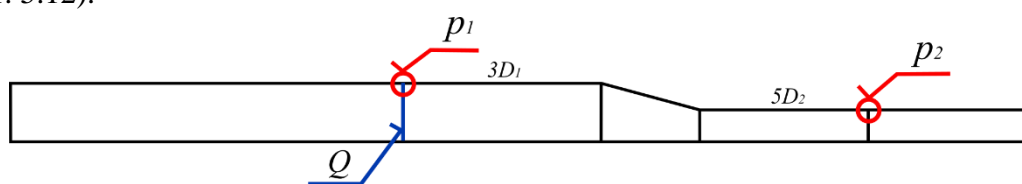
5.2.4 Nastavení snímačů

K určení Penstock faktoru dané části potrubí je nutné znát průběh statických tlaků během zavírání na vstupu a výstupu z této domény. Ke snímání statických tlaků byly u stěn výpočetové domény umístěny sondy. Další výstupní veličinou z Fluentu byl průtok, který byl snímán napříč celým vstupním průřezem jako integrál axiální rychlosti. Na následujících obrázcích je vidět rozmístění snímačů tlaku (červené) a průtoku (modré) v jednotlivých výpočetových doménách.



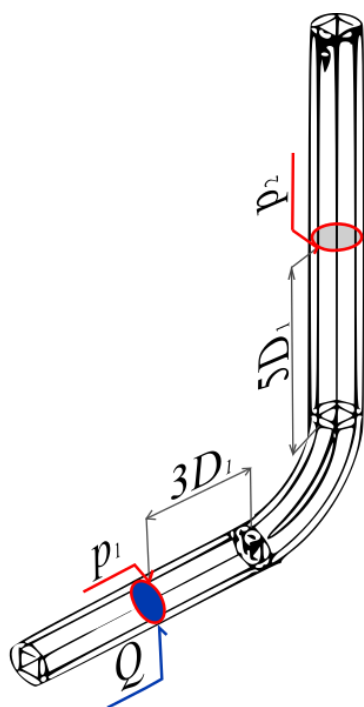
Obr. 5.12: Rozmístění snímačů jednotlivých veličin pro přímé potrubí

Jak již bylo výše v práci zmíněno, tak výpočet rovného potrubí s neměnicím se průřezem byl proveden pouze k ověření správného přístupu k vyhodnocení Penstock faktoru z vypočítaných hodnot Fluentem. Jelikož proudění vody v přímém potrubí není nijak narušeno žádnou změnou geometrie, je možné odebírat tlaky p_1 a p_2 hned na hranici zkoumané části potrubí (viz obr. 5.12).

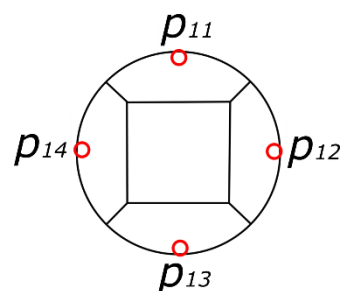


Obr. 5.13: Rozmístění snímačů jednotlivých veličin pro kónus

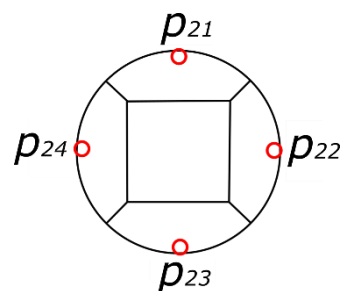
U výpočtu kónusu bylo zapotřebí snímače umístit tak, aby vlivem změny průřezu nedocházelo k ovlivnění snímaných veličin (viz obr. 5.13). Vzdálenost před ním není příliš podstatná a byla stanovena na trojnásobek průměru $D_1 = 4,5 \text{ m}$. Proudění bylo ovlivněno zejména za zúžením, kde docházelo v důsledku vysokých rychlostí a malé délky kónusu k odtrhávání proudu od stěny potrubí. Proto byl snímač tlaku p_2 umístěn ve vzdálenosti pětinasobku průměru $D_2 = 2,5 \text{ m}$.



Obr. 5.14: Rozmístění snímačů jednotlivých veličin pro koleno



Obr. 5.15: Rozmístění snímačů tlaku v průřezu p_1



Obr. 5.16: Rozmístění snímačů tlaku v průřezu p_2

U výpočetní domény kolena byl statický tlak odebírán ve dvou průřezích p_1 a p_2 . Umístění těchto průřezů je vidět na obrázku 5.14, kde před kolenem jsou snímače tlaku p_1 ve vzdálenosti trojnásobku průměru potrubí $D_1 = 4,5 \text{ m}$ a za kolenem p_2 ve vzdálenosti pětinasobku průměru potrubí. Poloha průřezu p_2 je v takové vzdálenosti za kolenem, aby nedocházelo k výraznému ovlivnění celkového statického tlaku v průřezu. Pokud by totiž byl tlakový odběr p_2 umístěn v menší vzdálenosti jako $5D_1$, tak by snímač p_{21} vykazoval velmi nízkou hodnotu tlaku oproti ostatním tlakovým snímačům v průřezu, čímž by byl ovlivněn výsledný statický tlak. V každém z průřezů p_1 a p_2 byly u stěny potrubí rovnoměrně rozmístěny čtyři tlakové snímače dle obrázků 5.15. a 5.16. Odběr průtoku je vyznačen na obrázku 5.14. modrou barvou a je zaznamenáván po celém průřezu p_1 .

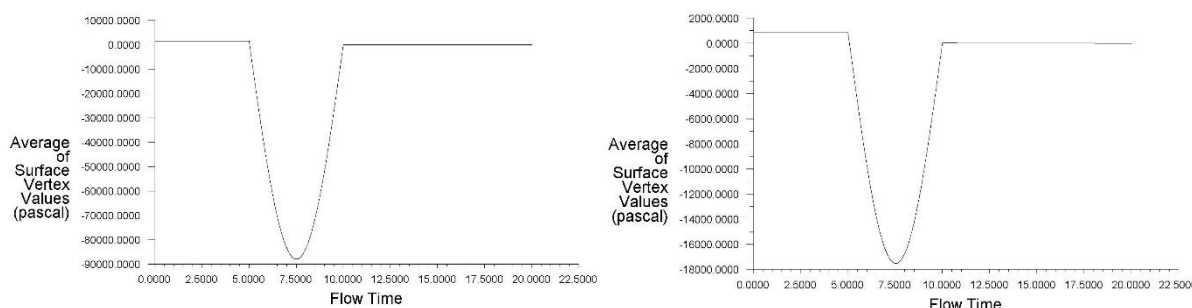
Snímače statického tlaku a průtoku byly nastaveny ve Fluentu pro všechny počítané případy totožně. Statický tlak byl vypisován funkcí Vertex Average, která dělá průměr z vybrané buňky a všech sousedících buněk. Průtok byl vyhodnocen přímo z Fluentu jako integrál axiální rychlosti v daném místě výpočetní domény.

5.3 CFD výpočty

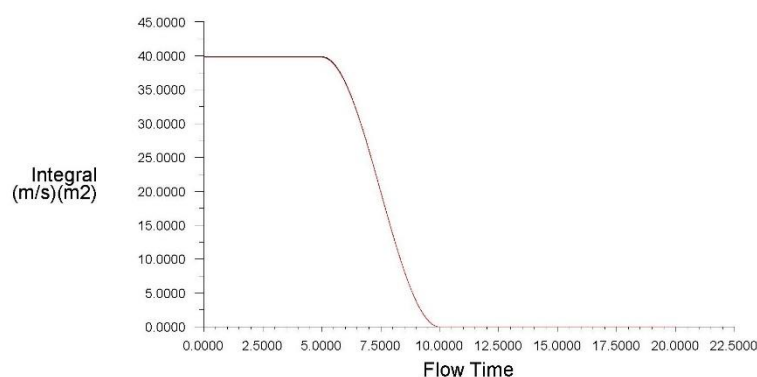
Všechny segmenty potrubí byly počítány stejným způsobem. Prvních pět sekund byl tlak a průtok počítán stacionárně, a poté se začal průtok zastavovat po dobu 5 s. Nakonec bylo dopočítáno 10 sekund s nulovým průtokem. Doba zavírání průtoku byla u přímého potrubí a kolena stanovena na 5 s. U kónusu byly provedeny doplňující série výpočtu pro zavírací časy $t = 4 \text{ s}, 3 \text{ s}, 2 \text{ s a } 1 \text{ s}$.

Během výpočtu bylo potřeba průběžně kontrolovat hodnotu wall y^+ , která omezuje použití stěnových funkcí. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, jež vyjadřuje kolmou vzdálenost od obtékané stěny. Hodnota wall y^+ závisí na rychlosti proudění. Jestliže během výpočtu dochází ke změně rychlosti, jako je tomu v tomto případě mezi pátou a desátou sekundou, musí se tato hodnota kontrolovat v průběhu celého výpočtu. Obecně je doporučeno se pro zvolenou stěnovou funkci pohybovat v rozmezí 20 až 120, v krajních případech až 300. U 2D výpočtů byly hodnoty wall y^+ v požadovaných mezích a u 3D domény kolena se pohybovaly v rozmezí 30 až 180, což je ještě v tolerančním pásmu.

Výstupními veličinami z Fluentu jsou tedy statické tlaky p_1 a p_2 (před a za zkoumaným segmentem) a průtok odebíraný ve stejném místě jako tlak p_1 . Na následujících obrázcích jsou vidět výstupní veličiny pro přímé potrubí.



Graf 5.2: Průběh statického tlaku p_1 z Fluentu Graf 5.3: Průběh statického tlaku p_2 z Fluentu



Graf 5.4: Průběh průtoku Q z Fluentu

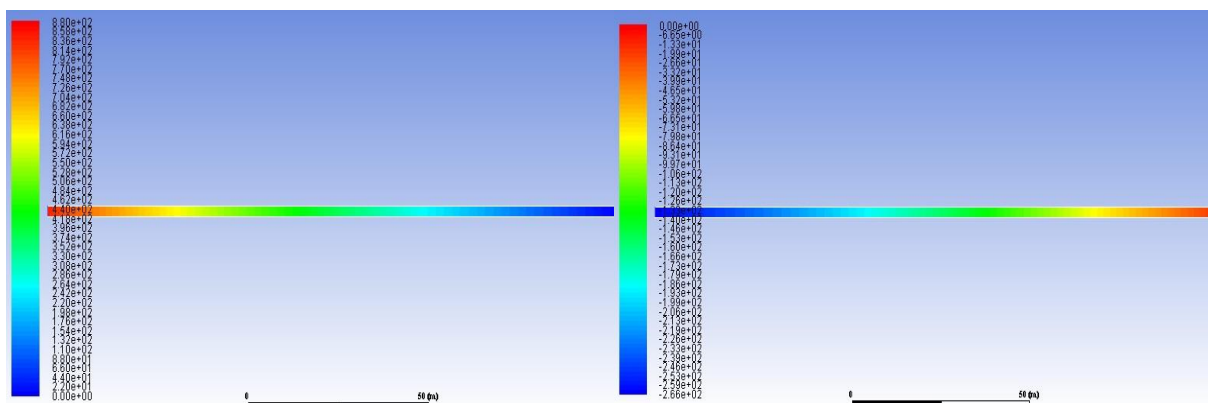
Průběhy těchto veličin u dalších počítaných segmentů budou zobrazeny v další kapitole, která je zaměřena na vyhodnocení Penstock faktoru z vypočítaných hodnot Fluentem.

5.4 Grafické výstupy z CFD výpočtů

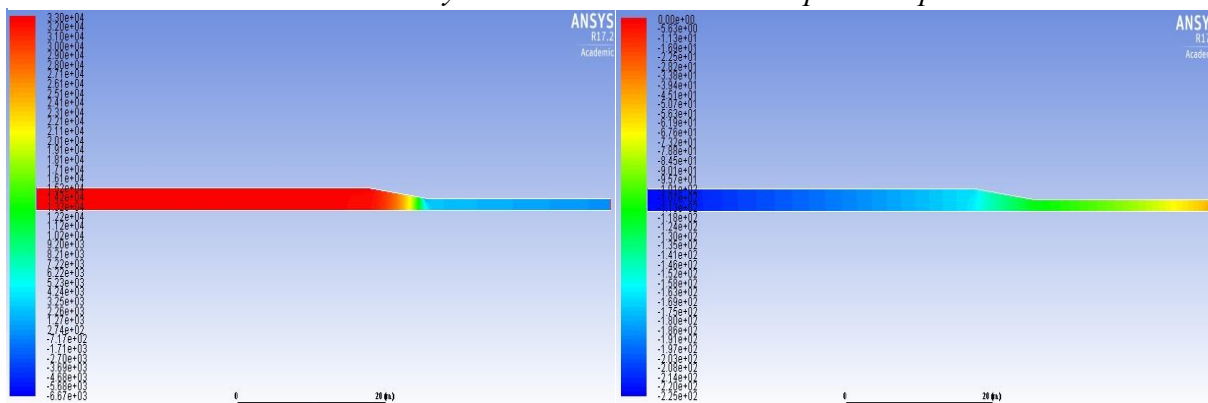
Proběhlo poměrně mnoho výpočtů, než byly vyhodnoceny dobré výsledky. Prvotním výstupem z Fluentu bylo grafické vyobrazení statických tlaků a rychlostí, které může posloužit pro představu proudění v počítaných segmentech potrubí.

V následujících obrázcích jsou postupně zobrazeny kontury statických tlaků a rychlostí v jednotlivých segmentech. Na levé straně je zobrazeno grafické rozložení dané veličiny těsně před snižováním rychlosti (tedy při ustáleném průtoku) a vpravo totožný obrázek po úplném uzavření průtoku (ve výpočetním čase 10 s). Všechny uvedené snímky jsou pro čas zavírání $t = 5$ s.

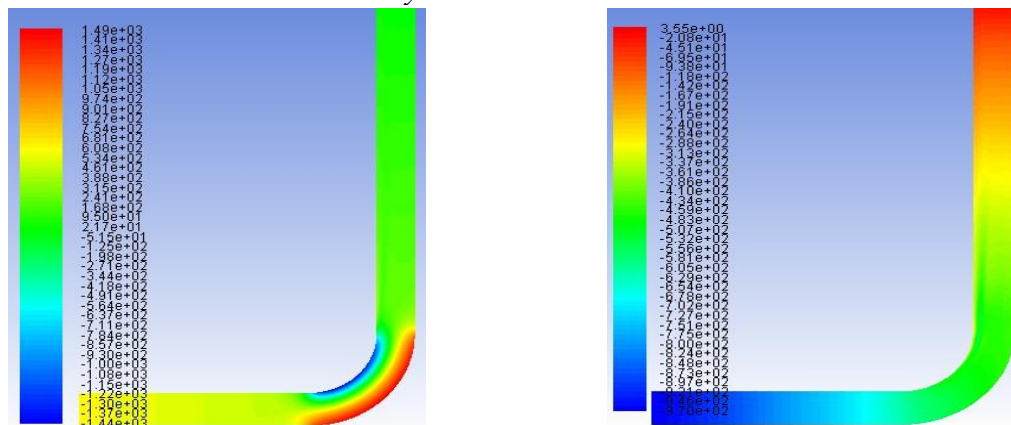
Vykreslení statických tlaků



Obr. 5.17: Kontury statického tlaku v doméně přímého potrubí



Obr. 5.18: Kontury statického tlaku v doméně kónusu



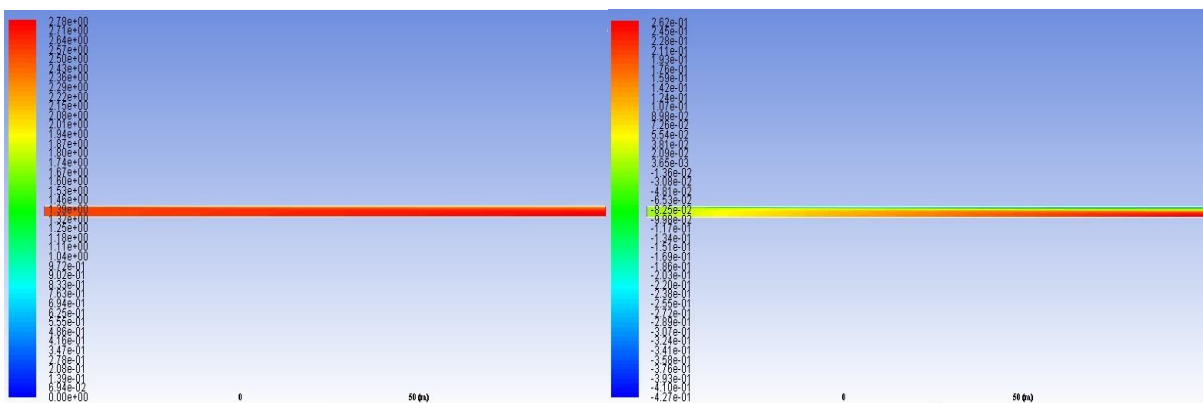
Obr. 5.19: Kontury statického tlaku na střednici kolena

Velikosti statických tlaků na obrázcích nejsou reálné, protože při výpočtu byla uvažována nestlačitelná kapalina. Tlak v doméně je ovlivněn zvolenou velikostí statického tlaku v okrajové podmínce, kterou je možné u tohoto typu výpočtů libovolně měnit. U všech obrázků se dá říci, že při ustáleném průtoku se hodnota statického tlaku doménou plynule měnila až k nulové hodnotě stanovené okrajovou podmínkou na výstupu. Po úplném uzavření průtoku je nejvyšší tlak na výstupu s předepsanou nulovou hodnotou, a naopak nejnižší tlak je koncentrován na vstupu domény.

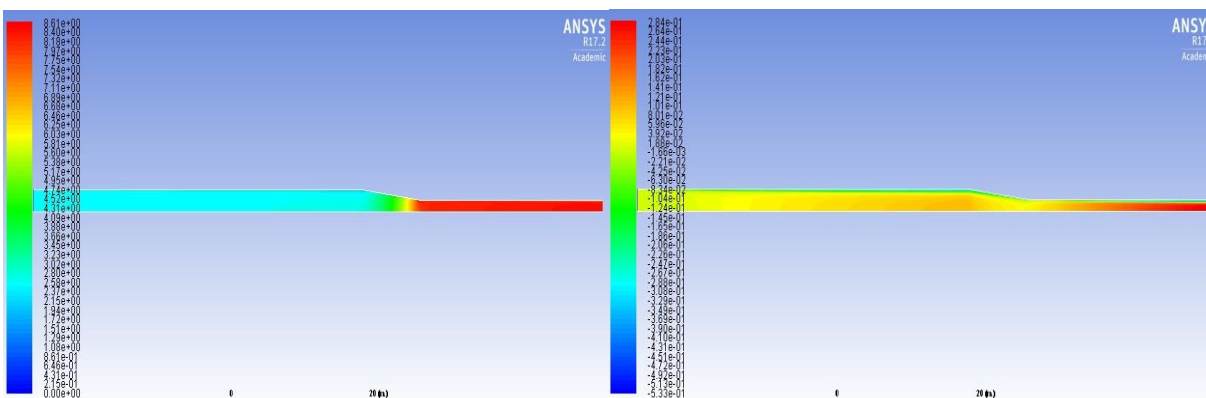
U kónusu je vlivem změny průřezu tlak ovlivňován rychlostí proudícího média. Z rovnice kontinuity vyplývá, že při stejném průtoku dochází v užším průřezu k nárůstu rychlosti. Zvýšení rychlosti v potrubí způsobí pokles tlaku, což vychází ze zákona zachování mechanické energie (Bernoulliho rovnice). Dá se říci, že ke změně tlaku dochází zejména v krátké oblasti zúžení, kdežto ve vstupním a výstupním potrubí je tlak téměř konstantní.

Kontury statických tlaků v oblasti kolena při ustáleném počátečním průtoku (obr. 5.19 vlevo) odpovídají chování proudu měnící směr o 90°. Dochází ke strhávání proudu a natlačení na horní stranu potrubí, kde se vlivem vysokých rychlostí objevuje velmi nízký tlak. Naopak na vnější stěně potrubí je tlak vyšší. Po zastavení průtoku je průběh statického tlaku doménou téměř totožný s průběhem v přímém potrubí.

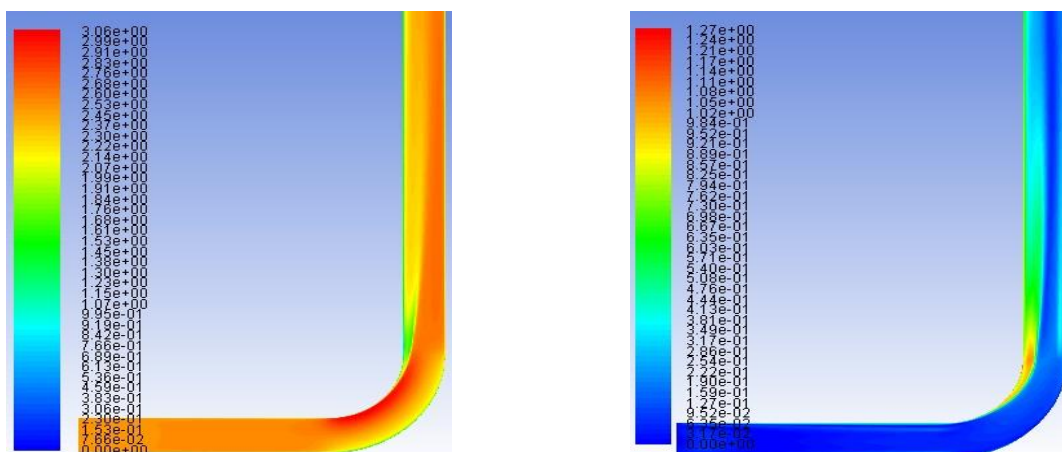
Vykreslení rychlostí



Obr. 5.20: Kontury axiální rychlosti v doméně přímého potrubí



Obr. 5.21: Kontury axiální rychlosti v doméně kónusu



Obr. 5.22: Kontury celkové rychlosti v doméně kolena

Z grafického vykreslení kontur axiální rychlosti v přímém potrubí plyne, že při ustáleném proudění je rychlost napříč doménou téměř konstantní. Vzhledem k délce domény z obrázku 5.20 na levé straně nejdou vidět velikosti rychlostí u stěny, na níž je předepsána podmínka ulpívání kapaliny. Uzavření průtoku způsobí řádově v setinách zpětné proudění u stěn domény napříč celou délkou viz obrázek 5.20 vpravo. U vstupu se zpětné proudění v blízkosti stěny sloučilo s prouděním uvnitř potrubí.

Vykreslení axiální rychlosti v doméně kónusu při ustáleném průtoku ukazuje přesně opačný průběh oproti kontur statického tlaku. To je způsobeno, jak bylo zmíněno výše, vlivem zákona zachování mechanické energie. Průběh kontur axiální rychlosti po uzavření (obr. 5.21 vpravo) se velmi podobá průběhu v rovném potrubí. Pokles rychlosti je koncentrován pouze do oblasti změny průřezu.

U 3D domény kolena bylo vykreslení kontur axiální rychlosti zbytečné, protože kapalina proudí v protisměru osy z a koleno proud usměrňuje do kladného směru osy y. Proto jsou na obrázku 5.22 vykresleny kontury celkové rychlosti pomocí funkce velocity magnitude, která je ve Fluentu definovaná jako součet druhých mocnin jednotlivých složek rychlosti pod odmocninou následovně:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (5.3)$$

kde v_x je rychlost ve směru osy x, v_y je rychlost ve směru osy y a v_z je rychlost ve směru osy z.

Z vykreslení celkové rychlosti při ustáleném počátečním proudění na obrázku 5.22 vlevo plyne, že se rychlosti v koleni koncentrují u vnitřní stěny. Tato rychlost je oproti rychlosti u stěny vnější téměř dvojnásobná. V důsledku toho za kolenem dochází k odtržení proudu a zmenšení průtočného průřezu. Z obrázku 5.22 vpravo se při zastaveném proudění značně projevuje zavírání proudícího média na výstupu z kolena. V oblastech hlavního proudu jsou hodnoty rychlostí téměř nulové (tmavě modrá). Tam, kde se kapalina vířila, nebo se její proud odtrhával, jsou rychlosti vyšší.

5.5 Vyhodnocení Penstock faktoru

Metoda tlak-čas se používá k určení průtoku na velkých vodních dílech, kde je možné měřit pouze statický tlak v přivaděči. Důvodem, proč se využívá k určení Penstock faktoru Fluent, je takový, že je možné snímat zároveň tlak i průtok. Proto se pak dá použitím metody tlak-čas zpětně vyhodnotit Penstock faktor pomocí Excelu. Vyhodnocení probíhá úplně stejně jako standardní vyhodnocení touto metodou s tím, že prvotní průtok Q_0 je získán z Fluentu a další jsou dopočítány podle vzorce (3.6). Jelikož k výpočtu průtoku je potřeba znát Penstock faktor, tak je prvotně volen libovolně na nějakou hodnotu, která bude později upravena Řešitelem. Nejprve byl celý postup aplikován pro výpočet Penstock faktoru pro přímé potrubí z důvodu ověření správnosti přístupu.

5.5.1 Přímé potrubí

Penstock faktor pro přímé potrubí s konstantním průřezem se v praxi počítá dle vztahu (1.8) jako podíl délky potrubí ku průřezu. Pro počítané 90m potrubí o průměru 4,5 m je teoreticky stanoven Penstock faktor následovně:

$$P_{f,teor} = \frac{L}{S} = \frac{90}{\pi \cdot \frac{4,5^2}{4}} = 5,658842 \text{ m}^{-1}$$

kde L je délka zkoumané potrubní části a S je konstantní průřez potrubí.

Vyhodnocení bylo provedeno v programu MS Excel. Nejprve bylo třeba naimportovat tlaky a průtok z Fluentu.

Flow Time	Vertex Average Static Pressure	Vertex Average Static Pressure	Integral Axial Velocity
t [s]	p_1 [Pa]	p_2 [Pa]	Q_f [m ³ s ⁻¹]
0,01	559,590271	108,5079346	39,75764937
0,02	559,590271	108,5079346	39,75764937

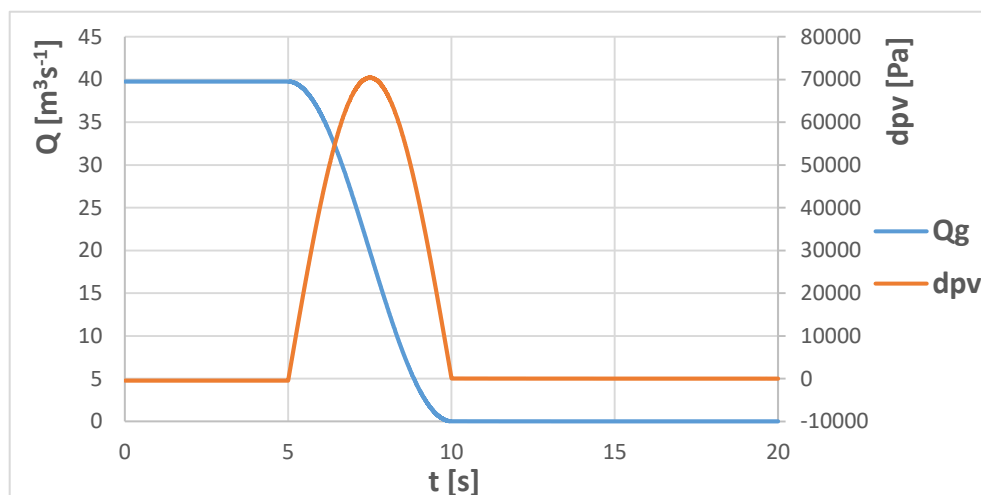
Tab. 5.1: Importované hodnoty statických tlaků na hranici zkoumané části potrubí

V následující tabulce jsou vidět vypočtené veličiny a importovaný průtok Q_f z Fluentu. Tlakový rozdíl dp_f se počítal jako rozdíl statických tlaků $p_2 - p_1$. Zpracování tlakového záznamu, tedy výpočet dp_v , výpočet odporového součinitele R a průtoku byl proveden analogicky podle kapitoly 3.4. Rozdíl od předchozího výpočtu je takový, že nyní je průtok známou veličinou a Penstock faktor P_f naopak neznámou. Aby bylo možné vypočítat průtok Q_g , tak musel být Penstock faktor zpočátku zvolen. Za počáteční průtok, označovaný v předchozí kapitole jako Q_0 , byla dosazena hodnota stacionárního průtoku Q_f z Fluentu (tedy hodnota průtoku mezi 0. a 5. s výpočtu). Další průtoky Q_g byly spočteny metodou tlak-čas vždy z předchozího kroku (stejně jako v kapitole 3.4).

dp_f [Pa]	dp_v [Pa]	Q_g [m ³ s ⁻¹]
-451,0823364	-458,9160252	39,75764937
-451,0823364	-458,9160252	39,75764937

Tab. 5.2: Zpracování tlakového záznamu a výpočet průtoku Gibsonovou metodou

Před použitím Řešitele je potřeba ještě vytvořit účelovou funkci, která je v tomto případě definovaná jako průměr průtoku Q_g mezi 15. a 20. s (viz graf 5.5), kde má být hodnota průtoku nulová. Proměnnou veličinou je tedy zvolený Penstock faktor. Řešitel pak tuto proměnnou mění v závislosti na požadované nulové hodnotě průtoku ve výše zmíněném intervalu.



Graf 5.5: Průběh vypočítaných veličiny po vyhodnocení Penstock faktoru pro potrubí

V prvním sloupci tab. 5.3 je vyhodnocený Penstock faktor P_f z hodnot vypočítaných Fluentem. Uprostřed se nachází teoretická hodnota Penstock faktoru vypočítána dle vzorce $P_{f,teor} = \frac{L}{S}$ a vpravo je odchylka obou Penstock faktorů vyjádřená v procentech. Z tabulky vyplývá, že Penstock faktor vyhodnocený Fluentem se liší přibližně o 0,07 %.

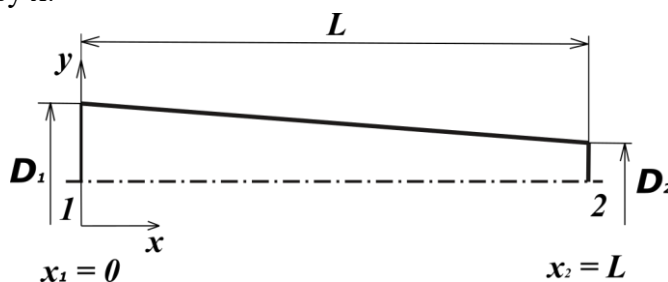
P_f [m ⁻¹]	$P_{f, teor}$ [m ⁻¹]	odchylka [%]
5,66275	5,65884	0,06907

Tab. 5.3: Srovnání vypočtených Penstock faktorů

Z výsledku je patrné, že zvolený přístup se dá považovat za správný a je možné jej použít k vyhodnocení Penstock faktoru pro kónus a koleno.

5.5.2 Kónus

Na počátku bylo důležité si opět dopočítat teoretickou hodnotu Penstock faktoru stejně tak, jak tomu bylo v předchozím případě. Vzorec pro výpočet je třeba odvodit. Pro odvození je uvažován kónus o délce L , počátečním průměru D_1 v místě 1 a konečném průměru D_2 v místě 2. Souřadný systém je umístěn v místě 1 s orientací os podle šipek. Délka kónusu L roste ve kladném směru osy x .



Obr. 5.23: Schéma kónusu

Odvození vychází ze základního vztahu (1.8) pro výpočet Penstock faktoru přímého potrubí:

$$P_f = \int_{L_1}^{L_2} \frac{l}{S} dl = \int_0^L \frac{l}{S} dx \quad (5.4)$$

Lineární změna průměru je předepsána vztahem:

$$D = D_1 + \frac{D_2 - D_1}{L} x \quad (5.5)$$

Po dosazení rovnice (5.5) lze vyjádřit vztah pro výpočet průřezu S:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi}{4} \left(D_1 + \frac{D_2 - D_1}{L} x \right)^2 \quad (5.6)$$

Dosazením vztahu (5.6) do původní rovnice (5.4) pro Penstock faktor vznikne:

$$P_f = \int_0^L \frac{l}{S} dx = \int_0^L \frac{l}{\frac{\pi}{4} \left(D_1 + \frac{D_2 - D_1}{L} x \right)^2} dx = \frac{4}{\pi} \int_0^L \frac{l}{\left(D_1 + \frac{D_2 - D_1}{L} x \right)^2} dx \quad (5.7)$$

Po integraci lze Penstock faktor vyjádřit následovně:

$$P_f = \frac{4}{\pi} \left[- \frac{\frac{L}{D_2 - D_1}}{\left(D_1 + \frac{D_2 - D_1}{L} x \right)} \right]_0^L \quad (5.8)$$

Obrácením integračních mezí ve vztahu (5.8) se dá eliminovat znaménko v závorce před zlomkem.

$$P_f = \frac{4}{\pi} \left[\frac{\frac{L}{D_2 - D_1}}{\left(D_1 + \frac{D_2 - D_1}{L} x \right)} \right]_L^0 \quad (5.9)$$

Dosazením integračních mezí vyjde následující tvar rovnice:

$$P_f = \frac{4}{\pi} \left[\frac{\frac{L}{D_2 - D_1}}{\left(D_1 + \frac{D_2 - D_1}{L} \cdot 0 \right)} - \frac{\frac{L}{D_2 - D_1}}{\left(D_1 + \frac{D_2 - D_1}{L} \cdot L \right)} \right] \quad (5.10)$$

Matematickými úpravami se rovnice (5.10) značně zjednoduší a vznikne konečný vztah pro výpočet Penstock faktoru kónusu:

$$P_f = \frac{4}{\pi} \frac{L}{D_1 D_2} = \frac{L}{\pi R_1 R_2} \quad (5.11)$$

kde L je délka zúžení průměru, R_1 je poloměr v místě 1 a R_2 je poloměr v místě 2.

Pro počítaný 7,6 m dlouhý kónus, který zužuje potrubí z průměru $D_1 = 4,5 \text{ m}$ na $D_2 = 2,5 \text{ m}$, je možné spočítat teoretickou hodnotu Penstock faktoru podle výše odvozeného vzorce dle vztahu (5.11) v následujícím tvaru:

$$P_{f,teor} = \frac{L}{\pi R_1 R_2} = \frac{7,6}{\pi \cdot 2,25 \cdot 1,25} = 0,860144 \text{ m}^{-1}$$

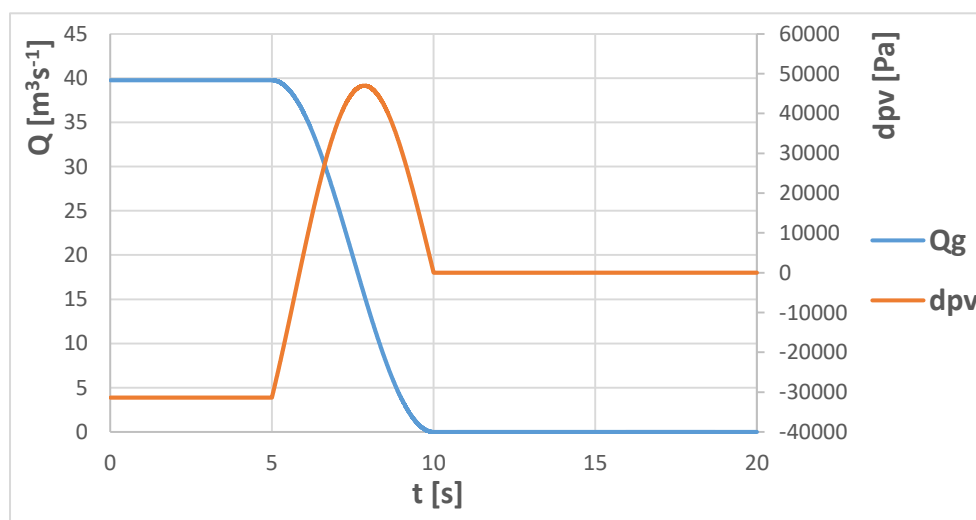
kde L je délka kónusu, R_1 je počáteční poloměr potrubí a R_2 je konečný poloměr potrubí.

Vyhodnocení probíhalo analogicky jako v případě přímého potrubí. Všechny vypočtené hodnoty Fluentem, byly naimportovány, dopočítány tlakové difference a použitím metody tlak-čas byl vyhodnocen průtok Q_g (viz tab. 5.4)

Importované veličiny				Počítané veličiny		
t [s]	p_1 [Pa]	p_2 [Pa]	Q_f [m ³ s ⁻¹]	dp_f [Pa]	dp_v [Pa]	Q_g [m ³ s ⁻¹]
0,01	32570,1	1198,37	39,7589	-31372	-31374	39,7589
0,02	32570,1	1198,37	39,7589	-31372	-31374	39,7589

Tab. 5.4: Importované a počítané veličiny pro vyhodnocení Penstock faktoru u kónusu

Z tabulky je patrné, že hodnoty tlaků ve snímačích byly oproti rovnému potrubí mnohem větší a tlaková ztráta způsobená zúžením průřezu je pochopitelně také mnohem vyšší. Tlaková ztráta je vidět i na následujícím obrázku, kde oranžovou čarou je vykreslena tlaková difference dp



Graf 5.6: Průběh vypočítaných veličiny po vyhodnocení Penstock faktoru pro kónus

Vyhodnocení Penstock faktoru pro kónus bylo provedeno stejně jako u přímého potrubí. Je nutné si ale uvědomit, že výsledek neodpovídá Penstock faktoru pro samotný kónus, ale celé části potrubí mezi snímači p_1 a p_2 z obrázku 5.12. V následující tabulce je celkový Penstock faktor označen jako $P_{f,c}$.

$P_{f,c}$ [m ⁻¹]	$P_{f,3D1}$ [m ⁻¹]	$P_{f,5D2}$ [m ⁻¹]
4,25714029	0,848826	2,546479

Tab. 5.5: Vypočítané Penstock faktory jednotlivých částí domény

Kromě celkového Penstock faktoru jsou v tabulce 5.5 vypočítané Penstock faktory částí potrubí mezi kónusem a snímači tlaku p_1 a p_2 . Výpočet těchto hodnot byl proveden aplikací vzorce (1.8) pro přímé potrubí před kónusem o průměru $D_1 = 4,5 \text{ m}$ a potrubí po zúžení průřezu o průměru $D_2 = 2,5 \text{ m}$:

$$P_{f_{3D_1}} = \frac{L_1}{S_1} = \frac{3 \cdot D_1}{\pi \cdot \frac{D_1^2}{4}} = \frac{3 \cdot 4,5}{\pi \cdot \frac{4,5^2}{4}} = 0,848826 \text{ m}^{-1}$$

kde L_1 je délka potrubí o průřezu S_1 mezi snímačem p_1 a vstupem do kónusu.

$$P_{f_{5D_2}} = \frac{L_2}{S_2} = \frac{5 \cdot D_2}{\pi \cdot \frac{D_2^2}{4}} = \frac{5 \cdot 2,5}{\pi \cdot \frac{2,5^2}{4}} = 2,546479 \text{ m}^{-1}$$

kde L_2 je délka potrubí o průřezu S_2 mezi výstupem z kónusu a snímačem p_2 .

Celkový Penstock faktor P_{f_C} mezi snímači tlaku p_1 a p_2 se dá vyjádřit jako součet Penstock faktorů jednotlivých částí dle vzorce:

$$P_{f_C} = P_{f_{3D_1}} + P_{f_k} + P_{f_{5D_2}} \quad (5.12)$$

kde $P_{f_{3D_1}}$ je Penstock faktor potrubí před kónusem, P_{f_k} je Penstock faktor počítaného kónusu a $P_{f_{5D_2}}$ reprezentuje Penstock faktor potrubí za kónusem.

Z rovnice (5.12) se dá jednoduchou úpravou vyjádřit požadovaný Penstock faktor samotného kónusu P_{f_k} následovně:

$$P_{f_k} = P_{f_C} - P_{f_{3D_1}} - P_{f_{5D_2}} \quad (5.13)$$

Po dosazení se Penstock faktor počítaného kónusu P_{f_k} rovná:

$$P_{f_k} = 4,257140 - 0,848826 - 2,546479 = 0,861835 \text{ m}^{-1}$$

V následující tabulce je vidět srovnání jednotlivých Penstock faktorů kónusu a jejich odchylka vyjádřená v procentech.

$P_{f_{konus}}$ [m ⁻¹]	$P_{f, teor}$ [m ⁻¹]	odchylka [%]
0,861835	0,860144	0,19657

Tab. 5.6: Porovnání výsledných Penstock faktorů

Z tabulky 5.6 plyne, že odchylka vyhodnoceného Penstock faktoru Fluentem pro zavírání průtoku po dobu pěti sekund je přibližně 0,2 %.

Další časy zavírání

Dalším úkolem v této diplomové práci bylo ověření vyhodnoceného Penstock faktoru pro jiné zavírací časy. Zjistit jaký má vliv čas zavírání na výpočet výsledného Penstock faktoru. Výpočty byly provedeny pro následující časy zavírání:

- $t = 4 \text{ s}$
- $t = 3 \text{ s}$
- $t = 2 \text{ s}$
- $t = 1 \text{ s}$

Výpočet ve Fluentu byl pro jednotlivé časy zavírání nastaven stejně (časový krok, okr. podmínky, nastavení řešitele). Jediným rozdílem bylo stanovení vstupní okrajové podmínky pomocí definované uživatelské funkce, v níž se měnila perioda cosinu a podmínky změny rychlosti v průběhu výpočtu. Nejdříve bylo potřeba pro každý čas zavírání vypočítat úhlovou rychlost podle vztahu (5.2). V tabulce 5.7 jsou uvedeny výsledky úhlových rychlostí pro jednotlivé časy zavírání.

t [s]	ω [rad.s]
4	0,785398
3	1,047197
2	1,570796
1	π

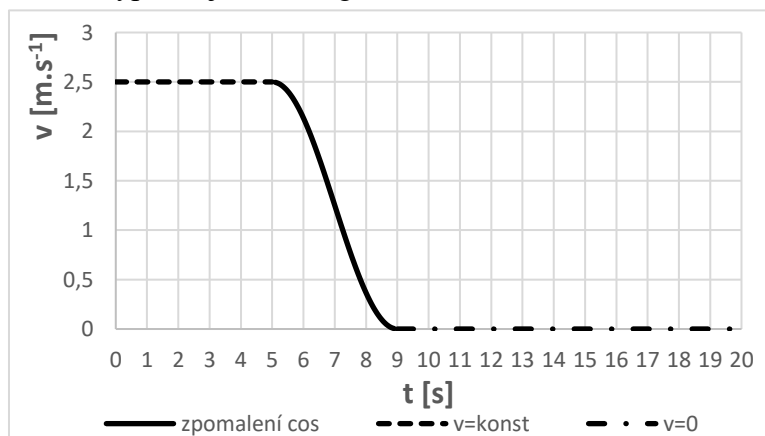
Tab. 5.7: Vypočítané úhlové rychlosti pro jednotlivé časy zavírání

– Čas zavírání $t = 4$ s

Kvůli rozsahu obrázků v diplomové práci nebudou uváděny celé předepsané uživatelské funkce, ale pouze podmínka *if*, která se pro každý čas zavírání lišila. Z tabulky 5.7 je pro zavírání po dobu 4 s vypočtená úhlová rychlost $\omega = 0,785398 \text{ rad} \cdot \text{s}$ a podmínka uživatelské funkce *if* je pak předepsána ve tvaru:

```
/*-----*/
if (t >= 5 && t <= 9)
F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5*0.5*(1+cos(0.785398*(t-5)));
else if (t > 9)
F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
else
F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5;
/*-----*/
```

Mezi 5. a 9. s je rychlost zpomalována předepsanou funkcí. Před pátou sekundou se rychlost rovná $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a po zastavení rychlosti v 9. s pokračuje konstantně na nulové hodnotě. Průběh rychlosti během výpočtu je vidět v grafu 5.7.



Graf 5.7: Průběh vstupní okrajové podmínky pro $t = 4$ s

- Čas zavírání $t = 3$ s

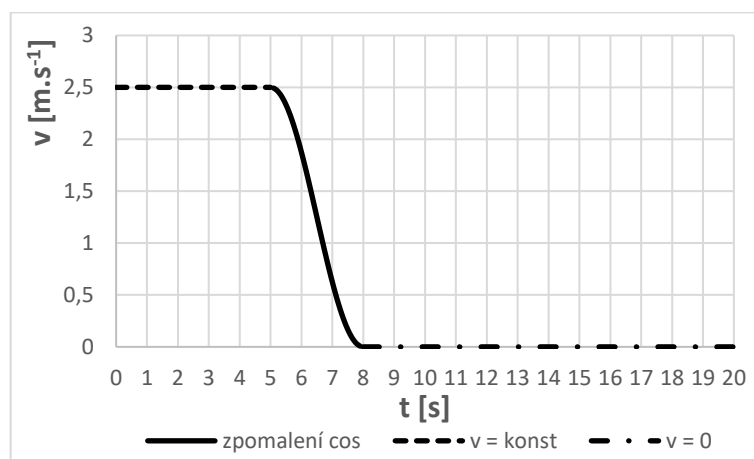
Pro tento zavírací čas je úhlová rychlost z tabulky 5.7 rovna $1,047197 \text{ rad} \cdot \text{s}$. Zvyšující se hodnota uhlové rychlosti a zkracující se doba zpomalování stahuje funkci cosinus ve vodorovném směru. Okrajová podmínka pro čas zavírání 3 s vypadá takto:

```

/*-----*/
if (t>=5 && t<=8)
F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5*0.5*(1+cos(1.047197*(t-5)));
else if (t>8)
F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
else
F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5;
/*-----*/

```

Podmínka vstupní rychlosti je opět strukturovaná stejně. Počáteční rychlost má do 5. s konstantní hodnotu (viz graf 5.8 čárkovaně), pak plynule klesá a od 8. s je rovna nule. Průběh rychlosti je zobrazen na grafu 5.8.



Graf 5.8: Průběh vstupní okrajové podmínky pro $t = 3$ s

- Čas zavírání $t = 2$ s

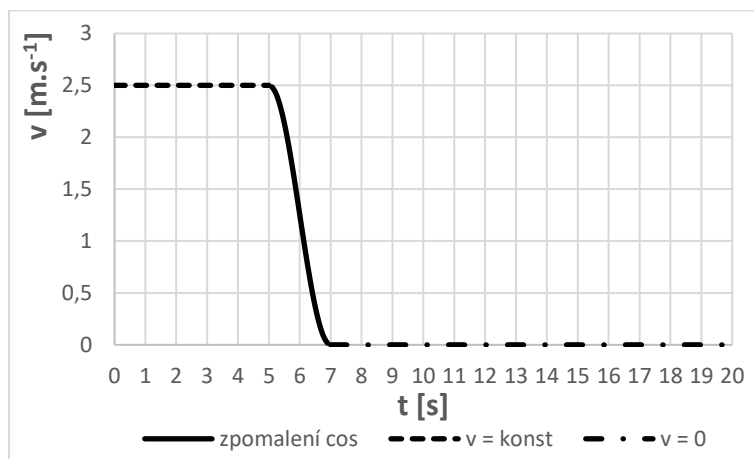
Vypočítaná úhlová rychlost z tab. 5.7 pro periodu $T = 4$ s se rovná $1,570796 \text{ rad} \cdot \text{s}$.

```

/*-----*/
if (t>=5 && t<=7)
F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5*0.5*(1+cos(1.570796*(t-5)));
else if (t>7)
F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
else
F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5;
/*-----*/

```

Podmínka uživatelské funkce *if* je definována tak, že mezi 5. a 7. s výpočtu se rychlost zpomaluje danou funkcí cosinus. Do páté sekundy je rychlost proudícího média konstantní, pak je zpomalena cosinem a v 7. s výpočtu klesne na nulovou hodnotu. Celý průběh rychlosti je znázorněn v grafu 5.9.



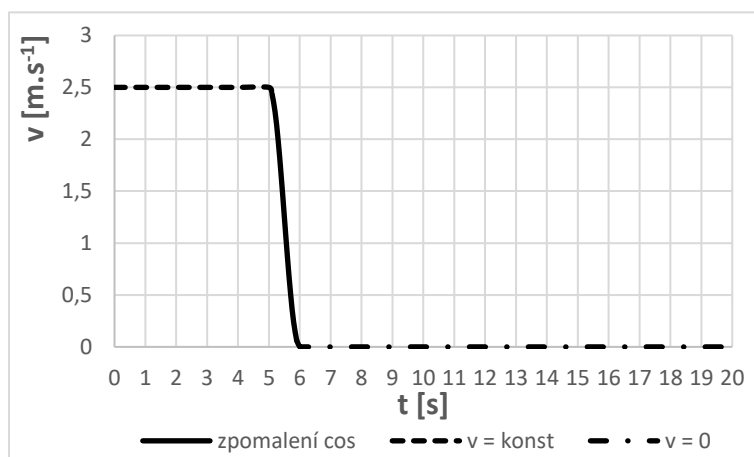
Graf 5.9: Průběh vstupní okrajové podmínky pro $t = 2$ s

Z průběhu rychlosti během výpočtu je vidět, že v 5. a 7. s se už ztrácí plynulý přechod v důsledku krátkého času zavírání.

- Čas zavírání $t = 1$ s

Jedna sekunda je už velmi krátký interval snížení rychlosti z 2,5 na $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Výsledná úhlová rychlost z tab. 5.7 je rovna hodnotě π .

```
/*-----*/
if (t >= 5 && t <= 6)
    F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5*0.5*(1+cos(3.141592*(t-5)));
else if (t > 6)
    F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
else
    F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5;
/*-----*/
```



Graf 5.10: Průběh vstupní okrajové podmínky pro $t = 1$ s

Podmínka je opět velmi podobná, jen se o sekundu zkrátil čas zavírání, takže se změnila i doplňující podmínka s nulovou rychlostí od 6. s výpočtu. Z grafu 5.10 je vidět průběh zpomalení, který je zkrácený na 1 s. V důsledku krátkého času zavírání se průběh rychlosti mezi 5. s a 6. s stal téměř lineárním a hladký přechod v páté a šesté sekundě zmizel.

Vyhodnocení Penstock faktorů pro jednotlivé časy zavírání uvedených v tab. 5.8 bylo provedeno analogicky. Nejdříve byl vypočítán z importovaných veličin celkový Penstock faktor, od kterého se pak odečetly dílčí Penstock faktory potrubí mezi snímači tlaku a vstupem či výstupem kónusu. V tabulce 5.8 jsou vypočítané Penstock faktory odpovídající pouze délce samotného zúžení. Vlevo je pro přehled uvedena teoretická hodnota Penstock faktoru podle odvozeného vzorce (5.11). Vpravo je pak vypočítaná odchylka teoretického Penstock faktoru od vyhodnoceného Penstock faktoru pomocí Fluentu pro jednotlivé časy zavírání.

$P_{f, teor}$ [m ⁻¹]	t [s]	$P_{f, konus}$ [m ⁻¹]	odchylka [%]
0,860144	5	0,861835	0,196569
	4	0,868241	0,941326
	3	0,868664	0,990579
	2	0,863499	0,390038
	1	0,864538	0,510798

Tab. 5.8: Odchylka vyhodnocených Penstock faktorů od teoretické hodnoty

Vyhodnocený Penstock faktor z hodnot spočítaných Fluentem se pro jednotlivé časy zavírání liší řádově v tisícinách vůči teoretické hodnotě. Odchylka plynoucí z tabulky 5.8 se pohybuje do 1 %. Z tabulky není patrná žádná závislost doby zavírání na velikosti odchylky. U prvního výpočtu s časem zavírání 5 s je odchylka vyhodnoceného Penstock faktoru nejmenší, skoro dvě desetiny procenta. Naproti tomu pro následující dva časy zavírání 4 a 3 s se odchylka blíží téměř k procentu, zejména u tří sekund zavírání. Doby zavírání menší jak 3 s vykazují střední chybu Penstock faktoru okolo půl procenta a méně.

5.5.3 Koleno

U kolena s neměnicím se průřezem je možné spočítat jeho Penstock faktor podle již několikrát zmíněného vzorce:

$$P_f = \frac{L_s}{S}$$

kde za L_s je osová délka kolena vyhodnocená z měření v přivaděči.

Z protokolu měření dispozice přivaděče na vodní elektrárně Lipno I se osová délka oblouku segmentového kolena rovná 16,27 m. Průměr potrubí je po celé délce konstantní 4,5 m. Teoretickou hodnotu Penstock faktoru pro koleno pak lze stanovit následovně:

$$P_{f, teor} = \frac{L}{S} = \frac{L_{s, kolena}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{16,27}{\pi \cdot \frac{4,5^2}{4}} = 1,022993 \text{ m}^{-1}$$

Prvním krokem ve vyhodnocení byl import vypočítaných hodnot tlaků v jednotlivých snímačích rozmístěných v tlakových odběrech (podle obr. 5.15 a 5.16) a průtoku snímaného před kolenem po celém průřezu p_1 (viz obr. 5.14).

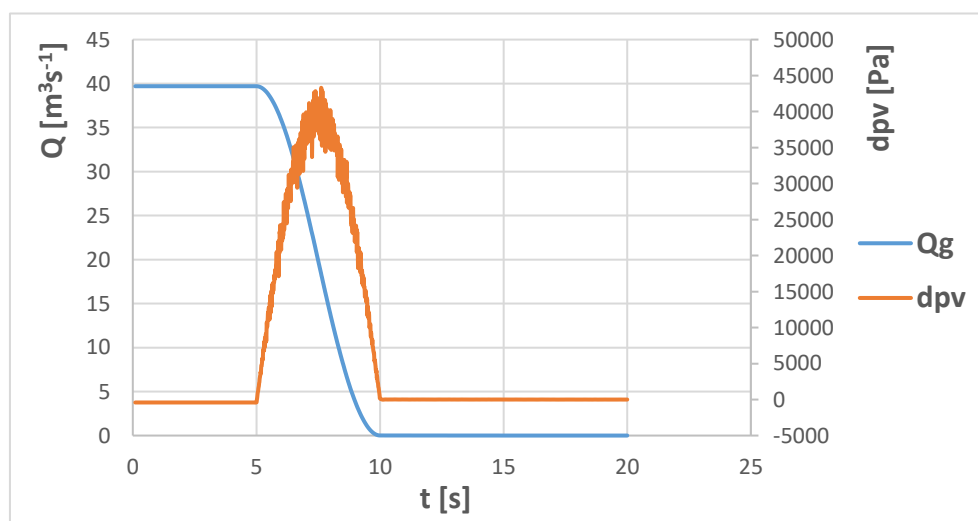
t [s]	p_{11} [Pa]	p_{12} [Pa]	p_{13} [Pa]	p_{14} [Pa]	p_{21} [Pa]	p_{22} [Pa]	p_{23} [Pa]	p_{24} [Pa]	Q_f [m ³ s ⁻¹]
0,1	505,78	505,80	505,81	505,80	153,07	128,95	133,64	128,99	39,70
0,2	506,22	506,24	506,25	506,24	153,37	129,26	133,95	129,30	39,70

Tab. 5.9: Importované veličiny z Fluentu

Vyhodnocení Penstock faktoru bylo provedeno stejně jako u vyhodnocení pro přímé potrubí. Nejprve byl vypočítán celkový tlak p_{1G} a p_{2G} jako průměrná hodnota v tlakových odběrech p_1 a p_2 . Rozdílem celkových statických tlaků byla získána tlaková diference, která byla následně vztažena k nule stejným způsobem jako v předchozích výpočtech. Vyhodnocení průtoku bylo provedeno standardně podle kapitoly 3.4. Průtok byl vyhodnocený se zvoleným Penstock faktorem. Prvotnímu průtoku Q_0 pak byla přiřazena hodnota stacionárního průtoku Q_f z Fluentu.

p_{1G} [Pa]	p_{2G} [Pa]	dp_f [Pa]	dp_v [Pa]	Q_g [m ³ s ⁻¹]
505,746276	126,5941789	-379,1520971	-406,766016	39,70050609
506,1843757	126,8986994	-379,2856764	-406,8995952	39,70050735

Tab. 5.10: Zpracování tlakového záznamu a výpočet průtoku Gibsonovou metodou



Graf 5.11: Průběh vypočítaných veličin po vyhodnocení Penstock faktoru

V grafu 5.11 je vykreslený oranžovou barvou průběh vypočítané tlakové diference a modrou barvou spočítaný průtok metodou tlak-čas. V průběhu tlakové diference je vidět v oblasti vrcholu velké rozkmitání záznamu. Tyto kmity se volbou menšího časového kroku mezi 5. a 10. s výpočtu ještě zvětšily a chyba vyhodnoceného Penstock faktoru zvětšila. Tento případ je počítán s časovým krokem $\Delta t = 0,01$ s.

Pro vyhodnocení celkového Penstock faktoru $P_{f,c}$ byl aplikován stejný způsob jako v předchozích případech pro přímé potrubí a kónus. Stejně tak jako u kónusu celkový Penstock faktor $P_{f,c}$ odpovídá celé části potrubí mezi tlakovými odběry p_1 a p_2 .

P_{f_c} [m ⁻¹]	$P_{f_{3D}}$ [m ⁻¹]	$P_{f_{5D}}$ [m ⁻¹]
3,174955	0,848826	1,414711

Tab. 5.11: Vypočítané Penstock faktory jednotlivých částí domény

V tabulce 5.11 je v levém sloupci vypočítaný celkový Penstock faktor potrubí mezi snímači p_1 a p_2 . K vyhodnocení Penstock faktoru samotného kolena bylo zapotřebí spočítat Penstock faktory jednotlivých částí potrubí před a za kolenem. Před kolenem jsou snímače umístěny ve vzdálenosti 3D a za kolenem ve vzdálenosti 5D. Potrubí má v celé délce konstantní průměr $D = 4,5$ m. Výpočet jednotlivých Penstock faktorů byl proveden následovně:

$$P_{f_{3D}} = \frac{L_1}{S} = \frac{3 \cdot D}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = \frac{3 \cdot 4,5}{\pi \cdot \frac{4,5^2}{4}} = 0,848826 \text{ m}^{-1}$$

kde L_1 je vzdálenost mezi vstupním průřezem kolena a tlakovým odběrem p_1 a S je konstantní průřez potrubí.

$$P_{f_{5D}} = \frac{L_2}{S} = \frac{5 \cdot D}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = \frac{5 \cdot 4,5}{\pi \cdot \frac{4,5^2}{4}} = 1,414711 \text{ m}^{-1}$$

kde L_2 je vzdálenost mezi výstupním průřezem kolena a tlakovým odběrem p_2 a S je konstantní průřez potrubí.

Pro výsledný Penstock faktor samotného kolena, který byl odvozen obdobně jako u kónusu, lze podle vztahu (5.13) psát:

$$P_{f_{koleno}} = P_{f_c} - P_{f_{3D}} - P_{f_{5D}} \quad (5.14)$$

Po dosazení se Penstock faktor počítaného kolena $P_{f_{koleno}}$ rovná:

$$P_{f_{koleno}} = 3,174955 - 0,848826 - 1,414711 = 0,911418 \text{ m}^{-1}$$

V následující tabulce je vidět porovnání jednotlivých výsledků a jejich odchylka vyjádřená v procentech.

$P_{f_{koleno}}$ [m ⁻¹]	$P_{f_{teor}}$ [m ⁻¹]	odchylka [%]
0,911418	1,022993	10,906722

Tab. 5.12: Porovnání jednotlivých Penstock faktorů

V tabulce 5.12 je uvedena odchylka teoretické hodnoty a vyhodnocené hodnoty Penstock faktoru kolena. Odchylka obou výsledků je téměř 11 %. Vyhodnocený Penstock faktor pomocí Fluentu je ovlivněn zvoleným časovým krokem a uvažované nestlačitelné kapaliny. Zajímavostí je, že vyhodnocený Penstock faktor z hodnot počítaných Fluentem je nižší než jeho teoretická hodnota. Vzhledem k časové náročnosti 3D výpočtů a množství jiných úkolů byl výsledek prohlášen za dostatečný, avšak nekorektní. Penstock faktor kolena by měl být nepatrně vyšší než jeho teoretická hodnota. Tato část diplomové práce je spíše předlohou k dalšímu řešení a navázání na dosavadní výsledky.

6 NESTACIONÁRNÍ ZTRÁTY [17]

Další chybu při vyhodnocení nestacionárního průtoku může způsobovat vliv nestacionárních ztrát. Tyto ztráty se projevují zejména u snižujícího se průtoku. Téma, týkající se nestacionárních ztrát, je v současné době zkoumáno mnoha výzkumnými institucemi. K předpovědi vlivu nestacionárních ztrát byly zavedeny výpočtové modely, které slouží k dosažení vyšší přesnosti vyhodnoceného průtoku. Nevýhodou těchto modelů je jejich použitelnost za předpokladu nižších Reynoldsových čísel.

K výpočtu celkového třecího koeficientu byl použit Brunonův třecí model v následujícím tvaru:

$$\lambda_c = \lambda_s + \frac{kD}{v|v|} \left(\frac{\partial v}{\partial t} - a \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (6.1)$$

kde λ_s je koeficient stacionárního tření, D je průměr potrubí, v je rychlost, $\frac{\partial v}{\partial t}$ je zrychlení, a je rychlost zvuku ve vodě, $\frac{\partial v}{\partial x}$ je konvektivní člen a k je bezrozměrný faktor, který určuje velikost vlivu nestacionárního tření.

Aby bylo možné vypočítat faktor k , je potřeba určit Vardyho koeficient. Pro laminární proudění je určen přímo jako $C^* = 0,00476$, a pro turbulentní proudění se počítá podle rovnice (6.2).

$$C^* = \frac{7,41}{Re^{\log\left(\frac{14,3}{Re^{0,05}}\right)}} \quad (6.2)$$

Faktor k je pak možné vypočítat dle následujícího vztahu:

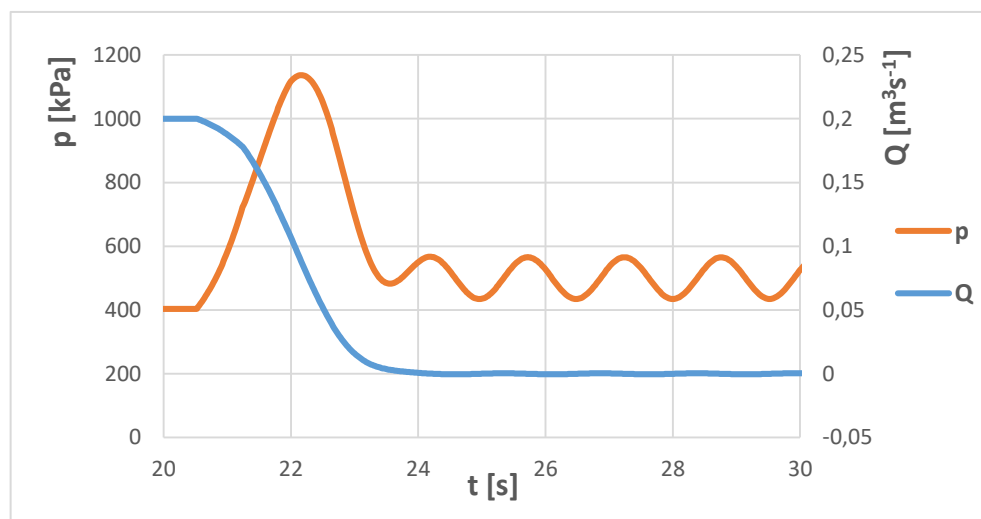
$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad (6.3)$$

Koeficient tření λ_s , který se ve světové literatuře označuje jako f_q , nabývá konstantní hodnoty pouze v hrubých potrubích nebo při silně turbulentním proudění. Koeficient tření je pak určen Darcyho vztahem pro laminární proudění $\lambda_s = \frac{64}{Re}$ a pro turbulentní proudění Haalandeho vztahem:

$$\lambda_s = \left\{ -1,8 \cdot \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} \right)^{1,11} \right] \right\}^{-2} \quad (6.4)$$

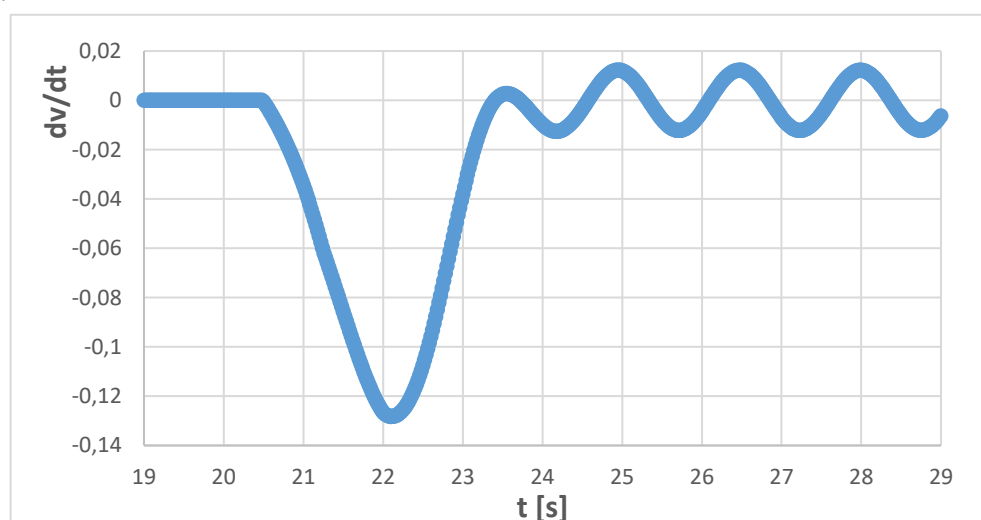
Jelikož voda zpomaluje, je nutné počítat Reynoldsovo číslo pro každý časový krok. Z těchto Reynoldsových čísel jsou pak dopočítány další veličiny v každém časovém okamžiku, jako je Vardyho koeficient, rychlost atd. V rovnici (6.4) ε značí absolutní drsnost potrubí.

Jedním z cílů této diplomové práce bylo stanovit vliv nestacionárních ztrát na Penstock faktor přivaděče. Numerický model ztrát byl vytvořen v programu MS Excel pro potrubí rozdělené na 20 bodů, ve kterých byly známé hodnoty tlaku a průtoku v každém časovém okamžiku. Doba zavírání byla stanovena na $T = 4$ s a zavírání začalo v čase 20,5 s. Model byl navržen pro potrubí o průměru $D = 0,3$ m a celkové délce 380 m. Délky jednotlivých úseků tedy byly $dx = 20$ m. V grafu 6.1 je zobrazen průběh tlaku a průtoku v závislosti na čase.



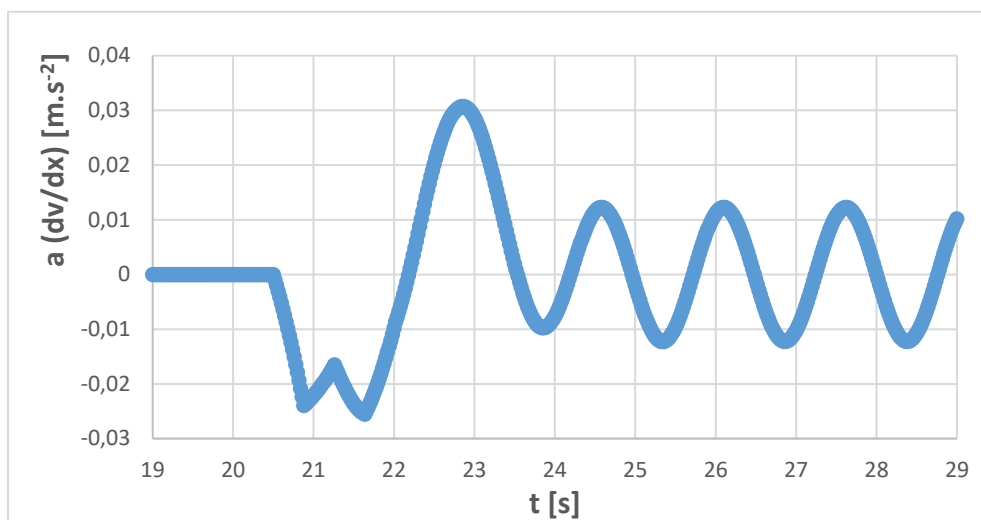
Graf 6.1: Závislost tlaku a průtoku na čase

Další částí vyhodnocení byl výpočet vlivu zrychlení a konvektivního členu z rovnice (6.1). K tomu bylo potřeba vypočítat hodnoty rychlostí v každém bodě a ty pak zprůměrovat vůči celému potrubí. Vydělením průměrné hodnoty rychlosti časovým krokem $\frac{\partial v}{\partial t}$ a dílčími délkami úseků $\frac{\partial v}{\partial x}$ vyjde celkový vliv těchto členů na výpočet nestacionárních ztrát.



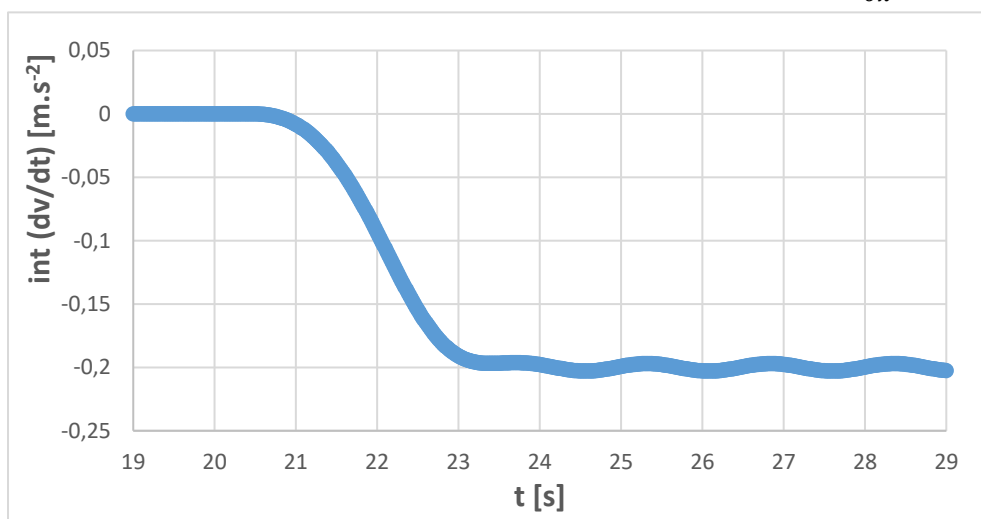
Graf 6.2: Vliv zrychlení

Z grafu 6.2 je patrné, že maximální vliv zrychlení se nachází ve 22. s výpočtu, kde hodnota zrychlení $\frac{\partial v}{\partial t}$ je přibližně $-0,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

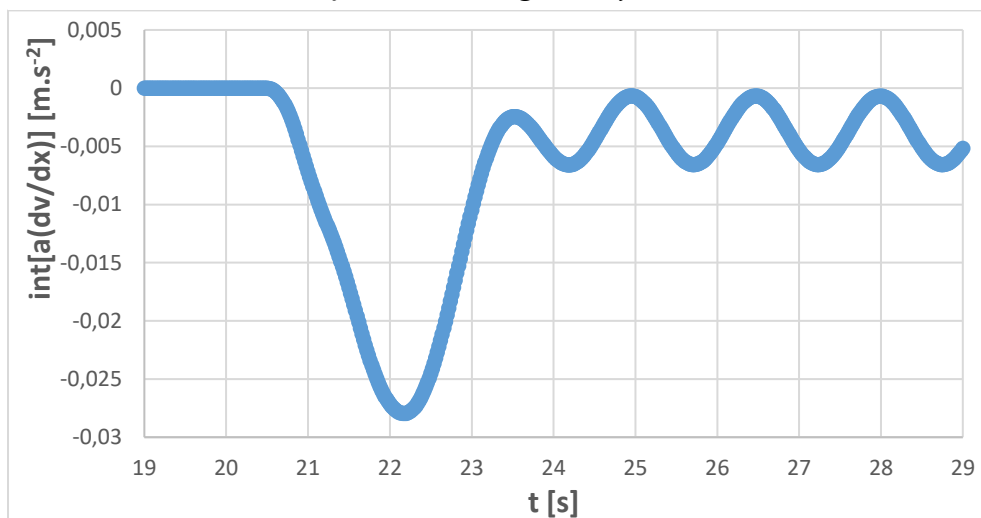


Graf 6.3: Vliv konvektivního členu

Člen konvektivní rychlosti, vynásobený rychlostí zvuku ve vodě, má více jak čtyři krát menší vliv než zrychlení. Maximální hodnota konvektivního členu z grafu 6.3 je $a \frac{\partial v}{\partial x} = 0,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.



Graf 6.4: Vliv integrálu zrychlení



Graf 6.5: Vliv integrálu konvektivního členu

Grafy 6.2 a 6.3 příliš nevyovídaly o vzájemném vlivu jednotlivých členů. Ovšem po integraci těchto členů, bylo z grafů 6.4 a 6.5 zjištěno, že integrál zrychlení z počáteční nulové hodnoty dokmitává na hodnotě přibližně $-0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, kdežto integrál konvektivního člen dokmitává už na hodnotě $-0,004 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Z těchto výsledků je patrné, že celkový vliv integrálu zrychlení je téměř 50x větší než vliv integrálu konvektivního členu.

Z důvodu velmi malého vlivu integrálu konvektivního členu oproti integrálu zrychlení, byl v rovnici (6.1) tento člen zanedbán. Výsledný vztah pro výpočet celkového třecího koeficientu je pak ve tvaru:

$$\lambda_c = \lambda_s + \frac{kD}{v|v|} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (6.5)$$

Celkové ztráty lze rozdělit na stacionární a nestacionární část:

$$Y_Z = Y_{ZS} + Y_{ZN} \quad (6.6)$$

Nestacionární ztráty se pak počítají dle vztahu:

$$Y_{ZN} = \lambda_N \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v|v|}{2} \quad (6.7)$$

Dosažením koeficient nestacionárního tření λ_N z rovnice (6.5) vpravo vyjde:

$$Y_{ZN} = \frac{kD}{v|v|} \frac{\partial v}{\partial t} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v|v|}{2} \quad (6.8)$$

Úpravou rovnice (6.8) vznikne vztah:

$$Y_{ZN} = \frac{kL}{2} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (6.9)$$

Vliv nestacionárních ztrát se projeví přidáním vztahu (6.9) na pravou stranu Bernoulliho rovnice (1.1), kde pro potrubí s konstantním průměrem platí:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + Y_{z12} + \int_1^2 a_t dL + \frac{kL}{2} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (6.10)$$

Nestacionární ztráty se pak projeví pouze ve výpočtu Penstock faktoru.

$$P_{f_nestac} = \frac{\partial v}{\partial t} \cdot L + \frac{k \cdot L}{2} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (6.11)$$

$$P_{f_nestac} = \frac{\partial v}{\partial t} \cdot L \cdot \left(1 + \frac{k}{2}\right) = P_f \cdot \left(1 + \frac{k}{2}\right) \quad (6.12)$$

Vyhodnocení vlivu nestacionárních ztrát bylo provedeno na datech z Lipenské vodní elektrárny. Nejprve je nutné zavést vzorec pro výpočet Reynoldsova čísla, které vyjadřuje poměr setrvačných a viskózních sil:

$$Re = \frac{v \cdot L_{CH}}{\nu} \quad (6.13)$$

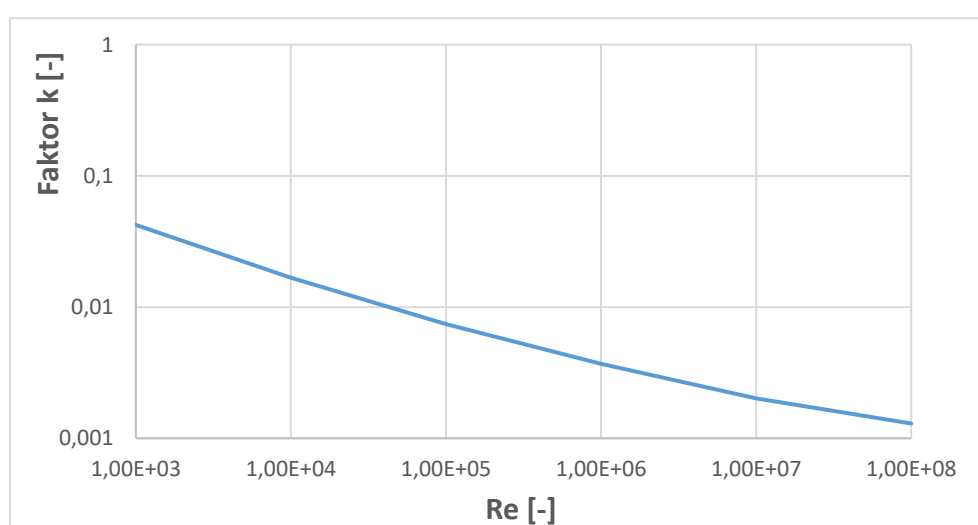
kde v je rychlost proudění, L_{CH} je charakteristický rozměr a ν je kinematická viskozita.

Pro VE Lipno I je počáteční rychlost proudění $v = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, charakteristický rozměr se u potrubí kruhového průřezu rovná průměru potrubí $D = 4,5 \text{ m}$ a uvažovaná kinematická viskozita je pro vodu o teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Dosazením konkrétních hodnot do vztahu (6.13) vyjde Reynoldsovo číslo, pro které pak bude odečten faktor k .

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{2,5 \cdot 4,5}{1 \cdot 10^{-6}} = 1,13 \cdot 10^7$$

Dalším krokem je výpočet Vardyho koeficientu pro turbulentní proudění podle vztahu (6.2) ze stanovených Reynoldsových čísel a dopočítání jednotlivých k faktorů rovnicí (6.3). V grafu 6.4 je zobrazen průběh závislosti Reynoldsova čísla na faktoru k .



Graf 6.6: Závislost velikosti faktoru k na Reynoldsově čísle

Z grafu 6.4 lze odečíst konkrétní hodnotu faktoru k pro vypočtené Reynoldsovo číslo $Re = 1,13 \cdot 10^7$, kterému náleží hodnota 0,002012. Dosazením naměřeného Penstock faktoru pro přivaděč Lipna I, uvedeného v kapitole 3 a k faktoru do vztahu (6.12) vyjde konečný Penstock faktor P_{f_nestac} s uvažovaným vlivem nestacionárních ztrát.

$$P_{f_nestac} = P_f \cdot (1 + k) = 10,896454 \cdot (1 + 0,002012) = 10,907416 \text{ m}^{-1}$$

P_f [m^{-1}]	P_{f_nestac} [m^{-1}]	odchylka [%]
10,896454	10,907416	0,100598

Tab. 6.1: Porovnání Penstock faktorů přivaděče VE Lipno I

Z tabulky 6.1 je vidět, že odchylka způsobená zahrnutím vlivu nestacionárních ztrát je přibližně 0,1 %. Takto malá chyba výpočtu je zanedbatelná. Lze se počítání nestacionárních ztrát vyvarovat uvažováním druhé viskozity. Chyba výpočtu nestacionárního průtoku metodou tlak-čas z vyhodnoceného Penstock faktoru P_{f_nestac} se pohybuje rovněž kolem dvou desetin procenta.

7 ZÁVĚR

Základním úkolem diplomové práce bylo objasnit problematiku vyhodnocení nestacionárního průtoku metodou tlak-čas a zaměřit se na aspekty, které mohou vést ke zpřesnění této metody. Vzhledem k tomu, že se přesnost vyhodnoceného průtoku metodou tlak-čas dle normy pohybuje v rozmezí 1,5-2,3 %, tak každá desetina procenta hraje obrovskou roli. V práci jsou vyhodnoceny vlivy jednotlivých členů, které jsou ve většině případů buď zanedbávány, nebo mají nepatrný vliv.

Vyhodnocení nestacionárního průtoku metodou tlak-čas je výhodné a velmi přesné. V české literatuře není vytvořena téměř žádná ucelená rešerše zaměřující se na tuto metodu a její problémy vyskytující se při jejím použití. Přínosem je ucelenost rešeršní části práce a podrobný návod vyhodnocení nestacionárního průtoku metodou tlak-čas.

Prvním aspektem, který měl vést ke zpřesnění výpočtu metodou tlak-čas bylo vyhodnocení vlivu kinetického členu. Tento člen se objeví jak ve vztahu pro průtok, tak ve vztahu pro odporový součinitel, čímž se jeho vliv téměř eliminuje. Odchylka vyhodnoceného průtoku s uvažováním kinetického členu je dvě setiny procenta, což odpovídalo při počátečním průtoku asi $0,008 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Největší chybu do výpočtu metodou tlak-čas zavádí člen nazývaný se Penstock faktor, v normě uváděný jako součinitel potrubí. Cílem práce bylo vyhodnotit Penstock faktor stanovených segmentů potrubí z hodnot napočítaných pomocí CFD simulace ve Fluentu a výsledky srovnat s teoretickými hodnotami Penstock faktorů vypočítanými dle odvozených vzorců. Vyhodnocený Penstock faktor přímého potrubí potvrzuje správnost přístupu minimální odchylkou od teoretické hodnoty, která je přibližně 0,07 %. Nemalá část práce je věnována vyhodnocení Penstock faktoru pro kónus. Bylo provedeno několik sérií výpočtů s různými časy zavírání. Hodnota odchylky vypočteného Penstock faktoru nijak nezávisí na době zavírání. Nejmenší odchylka 0,2 % byla vyhodnocena pro čas zavírání $t = 5 \text{ s}$. Naopak nejvyšší, téměř procentuální odchylky bylo dosaženo pro zavírací časy 3 a 4 s. Nejproblematictější vyhodnocením byl 3D výpočet kolena. Výsledný Penstock faktor počítaný podle parametrů uvedených v práci (dekompozice 3D domény, výpočetní síť a nastavení výpočtu), vyšel přibližně o jedenáct procent menší než jeho teoretická hodnota počítaná z naměřené délky střednice kolena. Výsledek je z velké části ovlivněn volbou časového kroku v oblasti zavírání (tedy mezi 5. a 10. s výpočtu). Zjemnění časového kroku způsobuje rozkmitání záznamu statických tlaků, což se projeví nepřesností vyhodnocení výsledného Penstock faktoru. Vzhledem k rozsahu práce a náročnosti výpočetního času u 3D domény kolena nebyly provedeny další výpočty. Tato část diplomové práce je spíše předlohou k dalšímu řešení a navázání na dosavadní výsledky. Dalším řešením je třeba se zaměřit na výpočetní síť, nastavení výpočtu a ověření vlivu stlačitelnosti kapaliny. Otázkou je, jak se změní Penstock faktor přímého potrubí a kónusu, jestliže budou počítány ve 3D doménách. Zajímavým přístupem by také bylo počítat celkový Penstock faktor přivaděče, ve kterém by byly umístěny jednotlivé segmenty v různém pořadí za sebou.

V poslední části diplomové práce je vyhodnocen vliv nestacionárních ztrát. Jejich vliv po odvození vstupuje pouze do výpočtu Penstock faktoru. Výsledný Penstock faktor přivaděče s uvažováním těchto ztrát se pak liší přibližně o 0,02 %.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *IEC standard 60041: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*. Third edition. 1991.
- [2] ADAMKOWSKI, Adam, Zbigniew KRZEMIANOWSKI a Waldemar JANICKI. Flow Rate Measurement using the Pressure-Time Method (Gibson Method) in a Hydropower Plant Curved Penstock. *7th International Conference On Hydraulic Efficiency Measurements - IGHEM 2008*. Milano, Italy, 2008.
- [3] Selected problems in calculation procedures for the Gibson discharge measurement method. ADAMKOWSKI, Adam a Waldemar JANICKI. *Proceedings, 8th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement - IGHEM 2010*. Roorkee, India, 2010, s. 73-80.
- [4] CHUDÝ, Vladimír. *Meranie technických veličín*. 1. vyd. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999, 688 s. : il. ISBN 8022712752.
- [5] KADLEC, Karel. Snímače tlaku - principy, vlastnosti a použití (část 1). *AUTOMA* [online]. b.r., **2007**(2), 28-31 [cit. 2017-05-16]. ISSN 1210-9592.
- [6] KADLEC, Karel. Snímače tlaku - principy, vlastnosti a použití (část 2). *AUTOMA* [online]. b.r., **2007**(7), 25-29 [cit. 2017-05-16]. ISSN 1210-9592.
- [7] KADLEC, Karel. Snímače tlaku - principy, vlastnosti a použití (část 3). *AUTOMA* [online]. b.r., **2007**(10), 23-26 [cit. 2017-05-16]. ISSN 1210-9592.
- [8] Vodní elektrárna Lipno. *SKUPINA ČEZ* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/lipno.html>
- [9] Vodní elektrárna Lipno. *ČESKÝ KRUMLOV* [online]. Český Krumlov, 2000 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.ckrumlov.cz/cz1250/region/soucas/i_eleli.htm
- [10] Vodní elektrárny Lipno - Informační centrum. *VYLETNIK* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://www.vyletnik.cz/profil/vodni-elektrarny-lipno-informacni-centrum/>
- [11] O společnosti. *OSC, a.s.* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.osc.cz/cz/firma/firma_cz.asp
- [12] Ponorné sondy k měření výšky hladiny LMP 307. *JSP Měření a regulace* [online]. Jičín, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_hladiny/ponorne_sondy/ponorne-sondy-k-mereni-vysky-hladiny-lmp-307.html

- [13] Snímače relativního a absolutního tlaku DMP 331 a DMP 333. *JSP Měření a regulace* [online]. Jičín, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorie/snimace_tlaku_a_tlakove_diference/snimace_tlaku_a_tlakove_diference_s_analogovym_vystupem/dmp-331-dmp-333-snimace-relativniho-absolutniho-tlaku.html
- [14] LMP 307. *BD SENSORS* [online]. Buchlovice, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.bdsensors.cz/vyska-hladiny/ponorne-sondy/detail/produkt/lmp-307/>
- [15] DMP 331. *BD SENSORS* [online]. Buchlovice, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.bdsensors.cz/tlak/snimace-tlaku/detail/produkt/dmp-331/>
- [16] *Discharge Measurements Using the Classic Gibson Method With Instrumentation Installed Inside a Pipeline*. JANICKI, Adam, Gustavo URQUIZA, Janusz KUBIAK a Miguel BASURTO. In: Volume 2: Fora. Jacksonville, Florida USA: ASME 2008, s. 399-405. ISBN 978-0-7918-4841-8.
- [17] RAMDAL, Jørgen. *Efficiency measurements in low head hydro power plants*. Trondheim, 2011. Doctoral Theses. Norwegian University of Science and Technology.
- [18] HABÁN, Vladimír a Petr ŠEFČÍK. *Využití metody tlak- čas pro měření průtoku na velkých vodních dílech*. HYDROTURBO 2001. Podbanské - Slovenská republika: Slovenské elektrárne, a.s. - VE Trenčín, 2001, 365 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
ρ	Hustota	[kg.m ⁻³]
p_i	Statický tlak v místě	[Pa]
S_i	Průřez potrubí	[m ²]
v_i	Rychlost proudění	[m.s ⁻¹]
v_0	Počáteční rychlost	[m.s ⁻¹]
g	Gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
Y_Z	Měrná ztrátová energie	[J.kg ⁻¹]
a_t	Nestacionární zrychlení	[m.s ⁻²]
Q_i	Průtok	[m ³ .s ⁻¹]
z_i	Výška	[m]
Δp	Tlakový nárůst	[Pa]
Δp_z	Pokles tlaku způsobený třecími ztrátami	[Pa]
P_f	Penstock faktor / Součinitel potrubí	[m ⁻¹]
R	Odporový součinitel	[Pa.s ² .m ⁻⁶]
t	Čas	[s]
t_0	Počáteční čas výpočtu	[s]
t_k	Koncový čas výpočtu	[s]
Δt	Časový krok	[s]
Q_0	Ustálený průtok	[m ³ .s ⁻¹]
B_i	Amplituda	[Pa]
h	Součinitel útlumu	[s ⁻¹]
δ	Logaritmický dekrement útlumu	[-]
T	Perioda	[s]
ω_0	Úhlová frekvence	[rad.s ⁻¹]
φ	Fáze	[rad]
F	Síla	[N]
D_i	Průměr	[m]
R_i	Poloměr	[m]

ω	Úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
T_0	Časová konstanta	[s]
L	Délka potrubí	[m]
λ_C	Celkový koeficient tření	[-]
λ_S	Koeficient stacionárního tření	[-]
λ_N	Koeficient nestacionárního tření	[-]
Y_{ZS}	Měrná ztrátová energie způsobená stacionárním třením	[J.kg ⁻¹]
Y_{ZN}	Měrná ztrátová energie způsobená nestacionárním třením	[J.kg ⁻¹]
a	Rychlost zvuku v kapalině	[m.s ⁻¹]
k	Vliv nestacionárního tření	[-]
C^*	Vardyho koeficient	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
ε	Absolutní drsnost potrubí	[m]
L_{CH}	Charakteristický rozměr	[m]
ν	Kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]

Zkratka Popis

CFD	Výpočtové modelování proudění
UDF	Uživatelsky definovatelná funkce
Penstock faktor	Součinitel potrubí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Schéma potrubí	17
Obr. 2.1: Schéma uspořádání tlakoměrů podle jejich měřicího rozsahu [5].....	23
Obr. 2.2: Tenzometrický tlakoměr [4]	24
Obr. 2.3: Kapacitní tlakoměr [4]	25
Obr. 2.4: Piezoelektrický tlakoměr [4].....	25
Obr. 3.1: Schéma vodní elektrárny Lipno [9]	26
Obr. 3.2: Vodní elektrárna Lipno II [10]	27
Obr. 3.3: Geometrie přivaděče	27
Obr. 3.4: Rozmístění snímačů v průřezu.....	28
Obr. 3.5: Místa tlakových odběrů	28
Obr. 3.6: Ponorná sonda typu LMP 307 [14].....	29
Obr. 3.7: Tlakový snímač typu DMP 331 [15]	29
Obr. 5.1: Přímé potrubí	36
Obr. 5.2: Kónus.....	36
Obr. 5.3: Koleno.....	36
Obr. 5.4: Dekompozice výpočtové domény přímého potrubí.....	37
Obr. 5.5: Dekompozice výpočtové domény kónusu	38
Obr. 5.6: Dekompozice výpočtové domény kolena	38
Obr. 5.7: Detail výpočtové sítě přímého potrubí	39
Obr. 5.8: Detail výpočtové sítě v oblasti zúžení průřezu	39
Obr. 5.9: Výpočtová síť v oblasti kolena	40
Obr. 5.10: Detail výpočtové sítě vnitřní části potrubí v oblasti kolena	40
Obr. 5.11: Detail dekompozice průřezu	40
Obr. 5.12: Rozmístění snímačů jednotlivých veličin pro přímé potrubí.....	43
Obr. 5.13: Rozmístění snímačů jednotlivých veličin pro kónus	43
Obr. 5.14: Rozmístění snímačů jednotlivých veličin pro koleno.....	44
Obr. 5.15: Rozmístění snímačů tlaku v průřezu p_1	44
Obr. 5.16: Rozmístění snímačů tlaku v průřezu p_2	44
Obr. 5.17: Kontury statického tlaku v doméně přímého potrubí	46
Obr. 5.18: Kontury statického tlaku v doméně kónusu.....	46
Obr. 5.19: Kontury statického tlaku na střednici kolena.....	46
Obr. 5.20: Kontury axiální rychlosti v doméně přímého potrubí.....	47
Obr. 5.21: Kontury axiální rychlosti v doméně kónusu	47
Obr. 5.22: Kontury celkové rychlosti v doméně kolena	48
Obr. 5.23: Schéma kónusu	50

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1.1: Průběh naměřených tlaků při metodou tlak-čas	19
Graf 1.2: Průběh tlakové diference mezi měřenými průřezy během zastavení průtoku [3]	21
Graf 1.3: Závislost chyby integrace průtoku na zvolené horní integrační mezi [18]	21
Graf 1.4: Detail útlumu tlakových oscilací [3]	22
Graf 3.1: Průběh naměřené a spočítané tlakové diference	30
Graf 3.2: Přepoččet prvotního průtoku pomocí Řešitele	32
Graf 3.3: Detail průběhu průtoku z grafu 3.2	33
Graf 3.4: Detail úpravy vyhodnoceného průtoku	33
Graf 4.1: Průběh vypočteného průtoku Q_k	34
Graf 4.2: Závislost odchylky průtoku na čase	35
Graf 5.1: Vstupní okrajová podmínka pro $v = 2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	42
Graf 5.2: Průběh statického tlaku p_1 z Fluentu	45
Graf 5.3: Průběh statického tlaku p_2 z Fluentu	45
Graf 5.4: Průběh průtoku Q z Fluentu	45
Graf 5.5: Průběh vypočítaných veličiny po vyhodnocení Penstock faktoru pro potrubí	50
Graf 5.6: Průběh vypočítaných veličiny po vyhodnocení Penstock faktoru pro kónus	52
Graf 5.7: Průběh vstupní okrajové podmínky pro $t = 4 \text{ s}$	54
Graf 5.8: Průběh vstupní okrajové podmínky pro $t = 3 \text{ s}$	55
Graf 5.9: Průběh vstupní okrajové podmínky pro $t = 2 \text{ s}$	56
Graf 5.10: Průběh vstupní okrajové podmínky pro $t = 1 \text{ s}$	56
Graf 5.11: Průběh vypočítaných veličin po vyhodnocení Penstock faktoru	58
Graf 6.1: Závislost tlaku a průtoku na čase	61
Graf 6.2: Vliv zrychlení	61
Graf 6.3: Vliv konvektivního členu	62
Graf 6.4: Vliv integrálu zrychlení	62
Graf 6.5: Vliv integrálu konvektivního členu	62
Graf 6.6: Závislost velikosti faktoru k na Reynoldsově čísle	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Tlakový záznam přímo ze snímačů	30
Tab. 3.2: Stanovení statické tlakové difference	31
Tab. 3.3: Výsledné zpracování tlakového záznamu.....	31
Tab. 3.4: Vyhodnocení tlakové difference dp pro výpočet odporového součinitele R	32
Tab. 3.5: Vyhodnocení průtoku	32
Tab. 4.1: Vstupní hodnoty.....	34
Tab. 4.2: Vypočtený průtok	34
Tab. 5.1: Importované hodnoty statických tlaků na hranici zkoumané části potrubí	49
Tab. 5.2: Zpracování tlakového záznamu a výpočet průtoku Gibsonovou metodou.....	49
Tab. 5.3: Srovnání vypočtených Penstock faktorů	50
Tab. 5.4: Importované a počítané veličiny pro vyhodnocení Penstock faktoru u kónusu	52
Tab. 5.5: Vypočítané Penstock faktory jednotlivých částí domény.....	52
Tab. 5.6: Porovnání výsledných Penstock faktorů.....	53
Tab. 5.7: Vypočítané úhlové rychlosti pro jednotlivé časy zavírání.....	54
Tab. 5.8: Odchylka vyhodnocených Penstock faktorů od teoretické hodnoty.....	57
Tab. 5.9: Importované veličiny z Fluentu	58
Tab. 5.10: Zpracování tlakového záznamu a výpočet průtoku Gibsonovou metodou.....	58
Tab. 5.11: Vypočítané Penstock faktory jednotlivých částí domény.....	59
Tab. 5.12: Porovnání jednotlivých Penstock faktorů	59
Tab. 6.1: Porovnání Penstock faktorů přivaděče VE Lipno I	64